

Technologiebericht

1.1 Bioenergie

innerhalb des Forschungsprojekts

TF_Energiewende

Martin Dotzauer

Diana Pfeiffer

Daniela Thrän

Volker Lenz

Marcel Pohl

Franziska Müller-Langer

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Disclaimer:

Das diesem Bericht zugrunde liegende Forschungsvorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 03ET4036A-C durchgeführt. Die Verantwortung für den Inhalt dieses Berichts liegt bei den Autoren und Autorinnen.

Bitte den Bericht folgendermaßen zitieren:

Dotzauer, M.; Pfeiffer, D.; Thrän, D.; Lenz, V.; Pohl, M.; Müller-Langer, F. (2018): Technologiebericht 1.1 Bioenergie. In: Wuppertal Institut, ISI, IZES (Hrsg.): Technologien für die Energiewende. Teilbericht 2 an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Wuppertal, Karlsruhe, Saarbrücken.

Hinweis:

Die multi-kriterielle Bewertung und generell die Erstellung dieses Berichts basiert auf den Vorgaben, die in Teilbericht 1 beschrieben sind:

Viebahn, P.; Kobiela, G.; Soukup, O.; Wietschel, M.; Hirzel, S.; Horst, J.; Hildebrand, J. (2017): Technologien für die Energiewende. Teilbericht 1 (Kriterienraster zur Bewertung der Technologien innerhalb des Forschungsprojekts TF_Energiewende) an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Wuppertal Institut, Fraunhofer ISI, IZES: Wuppertal, Karlsruhe, Saarbrücken.

Kontakt:

Martin Dotzauer

Tel.: +49 431 / 2434 – 385

Fax: +49 431 / 2434 – 130

E-Mail: martin.dotzauer@dbfz.de

Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH

Torgauer Straße 116

04317 Leipzig

Review durch:

Bernd Krautkremer (Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik)

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	3
Verzeichnis von Abkürzungen, Einheiten und Symbolen	5
Tabellenverzeichnis	6
Abbildungsverzeichnis	8
Zusammenfassung (Steckbrief)	10
1 Beschreibung des Technologiefeldes Bioenergie	12
1.1 Allgemeine Beschreibung und Struktur der Bioenergie in Deutschland	12
1.2 Technologiebeschreibung „Biochemische Biomassekonversion“, Konversionspfad: Anaerobe Fermentation mit motorischer KWK-Nutzung	14
1.3 Technologiebeschreibung „Thermo-chemische Konversion“, Konversionspfad: Biomassevergasung mit motorischer KWK-Nutzung	16
1.4 Technologiebeschreibung Hybrid–Bioraffinerie-Konversionspfad: Konzept für Synergien aus Bioenergie und Power-to-X (SynBioPtX-Konzept)	19
2 Stand F&E in Deutschland	21
2.1 Biochemische Biomassekonversion, Konversionspfad: Anaerobe Fermentation mit motorischer KWK-Nutzung	21
2.1.1 <i>Aktueller Entwicklungsstand</i>	22
2.1.2 <i>Künftiger Entwicklungsbedarf</i>	23
2.2 Thermo-chemische Biomassekonversion, Konversionspfad: Biomassevergasung mit thermo-chemischer KWK-Nutzung	25
2.2.1 <i>Aktueller Entwicklungsbedarf</i>	25
2.2.2 <i>Künftiger Entwicklungsbedarf</i>	26
2.3 Hybride Bioraffinerie, Konversionspfad: SynBioPtX-Konzept	29
2.3.1 <i>Aktueller Entwicklungsstand</i>	30
2.3.2 <i>Künftiger Entwicklungsbedarf</i>	30
3 Relevanz öffentlicher Förderung	32
3.1 Kriterium 1: Vorlaufzeiten	32
3.2 Kriterium 2: Forschungs- und Entwicklungsrisiken (technisch, wirtschaftlich, rohstoffseitig)	33
3.3 Zusammenfassung Förderrelevanz	36
4 Detaillierte Bewertung des Technologiefeldes	40
4.1 Kriterium 3: Marktpotenziale	40
4.2 Kriterium 4: Beitrag zu Klimazielen	40
4.3 Kriterium 5: Beitrag zur Energie- und Ressourceneffizienz	41
4.4 Kriterium 6: Kosteneffizienz	41
4.5 Kriterium 7: Inländische Wertschöpfung	42
4.6 Kriterium 8: Stand und Trends von F&E im internationalen Vergleich	43

4.7	Kriterium 9: Gesellschaftliche Akzeptanz	47
4.8	Kriterium 10: Unternehmerisch-technische Pfadabhängigkeit und Reaktionsfähigkeit	52
4.9	Kriterium 11: Abhängigkeit von Infrastrukturen	53
4.10	Kriterium 12: Systemkompatibilität	55
5	F&E-Empfehlungen für die öffentliche Hand	59
5.1	Einleitung	59
5.2	F&E Empfehlungen für die Technologiegruppe „Biochemische Biomassekonversion“	60
5.2.1	<i>Flexibilisierung der Energiebereitstellung</i>	60
5.2.2	<i>Rohstoffbasis</i>	60
5.2.3	<i>Kostenreduzierung, Effizienzsteigerung, Emissionsminderung</i>	61
5.3	F&E Empfehlungen für die Technologiegruppe „Thermo-chemische Konversion“	61
5.3.1	<i>Flexibilisierung der Energiebereitstellung</i>	61
5.3.2	<i>Rohstoffbasis</i>	62
5.3.3	<i>Kostenreduzierung, Effizienzsteigerung, Emissionsminderung</i>	62
5.4	F&E Empfehlungen für das SynBioPtX als hybride Bioraffinerie	62
5.4.1	<i>Flexibilisierung der Energiebereitstellung</i>	63
5.4.2	<i>Rohstoffbasis</i>	63
5.4.3	<i>Kostenreduzierung, Effizienzsteigerung, Emissionsminderung</i>	64
	Literaturverzeichnis	65

Verzeichnis von Abkürzungen, Einheiten und Symbolen

Abkürzungen

BGA	Biogasanlage
BECCS	Bioenergie & CCS
BHKW	Blockheizkraftwerk
Bio-SNG	Bio-Synthetic Natural Gas
BTL	Biomass-to-Liquid
CCS	Carbon-Capture-and-Storage – Kohlenstoff(dioxid)-Abtrennung und Lagerung
CnHm	Kohlenwasserstoffe
CO	Kohlenstoffmonoxid
DBFZ	Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH
EE	erneuerbare Energien
EEG	Erneuerbares Energien Gesetz
F&E	Forschung und Entwicklung
FRL	Fuel Readiness Level
HEFA	hydro-processed esters and fatty acids
HVO	hydrotreated vegetable oils
IEA	International Energy Agency
IKT	Informations- und Kommunikationstechnologien
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
NOx	Stickstoffoxide
ORC	Organic-Rankine-Cycle
PM10	Particular Matter 10 µ - Feinstaubklasse mit Partikelgrößen bis 10 µm
PtG	Power-to-Gas – Technologie zur Erzeugung von H ₂ oder CH ₄ aus Strom
PtX	Power to X (Überbegriff für Technologien zur Sektorkopplung)
PV	Photovoltaik
RED	Renewable Energy Directive (Erneuerbaren Energiendirektive der EU-Kommission)
RME	Raps-Methyl-Esther
SynBioPtX	Syntheseprodukte aus Biomasse und strombasierten Wasserstoff
TF	Technologiefeld
TG	Technologiegruppe
THG	Treibhausgasemissionen
TRL	Technical Readiness Level
VK	Virtuelles Kraftwerk

Einheiten und Symbole

%	Prozent
€	Euro
€/kW	Euro je Kilowatt
+ %/a	Relative Veränderung in Prozent pro Jahr
a	Jahr
ct/kWh	Eurocent je Kilowattstunde
h	Stunde
kW	Kilowatt
Mio. €	Millionen Euro
Mio. €/a	Millionen Euro pro Jahr
Mio. t CO ₂ -äq./a	Millionen Tonnen CO ₂ -Äquivalente pro Jahr
MW	Megawatt
PJ	Petajoule
TWh	Terrawattstunde
Vol.- %	Volumenprozent

Tabellenverzeichnis

Tab. 1-1	Beitrag der Bioenergie zur Energiewende für das Bezugsjahr 2015 -----	12
Tab. 1-2	Beispieltabelle für techno-ökonomische Kenndaten der Technologiegruppe „Anaerobe Biogasfermentation mit motorischer Nutzung in einem BHKW“ -----	16
Tab. 1-3	Beispieltabelle für techno-ökonomische Kenndaten des Konversionspfades „Thermo-chemische Konversion“ am Beispiel einer Dampfkesselanlage mit Turbinengetriebenem Generator -----	17
Tab. 1-4	Beispieltabelle für Techno-ökonomische Kenndaten der Technologiegruppe „Thermo-chemische Konversion“ mit dem Konversionspfad: Biomassevergasung und motorischer Nutzung in einem BHKW -----	18
Tab. 3-1	Vorlaufzeiten bis zur Kommerzialisierung für den Konversionspfad „Anaerobe Fermentation mit motorischer KWK-Nutzung“ -----	32
Tab. 3-2	Vorlaufzeiten bis zur Kommerzialisierung für den Konversionspfad „Biomassevergasung mit motorischer KWK-Nutzung“ -----	33
Tab. 3-3	Vorlaufzeiten bis zur Kommerzialisierung für den Konversionspfad „SynBioPtX- Konzept“ -----	33
Tab. 3-4	Aktuelles Entwicklungsstadium des gesamten Technologiefeldes Bioenergie sowie der betrachteten Technologiegruppen -----	34
Tab. 3-5	Bewertung technischer und wirtschaftlicher Forschungs- und Entwicklungsrisiken in Zusammenhang mit der Technologiegruppe „Biochemische Biomassekonversion“, Konversionspfad: Anaerobe Fermentation mit motorischer KWK-Nutzung -----	35
Tab. 3-6	Bewertung technischer und wirtschaftlicher Forschungs- und Entwicklungsrisiken in Zusammenhang mit der Technologiegruppe „Thermo-chemische Konversion, Konversionspfad: Biomassevergasung mit thermo-chemischer KWK-Nutzung -----	35
Tab. 3-7	Bewertung technischer und wirtschaftlicher Forschungs- und Entwicklungsrisiken in Zusammenhang mit der Technologiegruppe „Hybride Bioraffinerie“, Konversionspfad: SynBioPtX-Konzept -----	36
Tab. 4-1	Nationale Ausbaupfade Deutschlands für das Technologiefeld Bioenergie in den Sektoren Strom, Wärme und Verkehr (Maximale Allokation für die einzelnen Sektoren, kein konsistentes Gesamtportfolio) -----	40
Tab. 4-2	Beitrag zu Klimazielen -----	41
Tab. 4-3	Inländische Wertschöpfung basierend auf Technologiefeld Bioenergie hinsichtlich des nationalen Absatzmarktes -----	42
Tab. 4-4	Internationale Aufstellung der deutschen Industrie im Technologiefeld Bioenergie (Übergreifend für alle drei Technologiegruppen) -----	43
Tab. 4-5	F&E Budgets für die energetische Biomassenutzung in Deutschland, der EU und Weltweit für die Jahre 2010 bis 2015 und kumuliert für den Zeitraum 1974 bis 2015 in Mio. € -----	44
Tab. 4-6	Bewertung des Standes von Forschung und Entwicklung für das Technologiefeld Bioenergie -----	45
Tab. 4-7	Bewertung von Stand und Trends der Forschung und Entwicklung für das Technologiefeld „Biochemische Biomassekonversion“, Konversionspfad: Anaerobe Fermentation mit motorischer KWK-Nutzung – Output-Orientierung -----	46
Tab. 4-8	Bewertung von Stand und Trends der Forschung und Entwicklung für das Technologiefeld „Thermo-chemische Konversion“, Konversionspfad: Biomassevergasung mit motorischer KWK-Nutzung -----	47
Tab. 4-9	Bewertungsraster für die Akzeptanz der Technologiegruppe „Biochemische Biomassekonversion“, Konversionspfad: Anaerobe Fermentation mit motorischer KWK-Nutzung zum Status Quo (2015) -----	50
Tab. 4-10	Bewertungsraster für die Akzeptanz der Technologiegruppe „Thermo-chemische Biomassekonversion“, Konversionspfad: Biomassevergasung mit thermo- chemischer KWK-Nutzung zum Status Quo (2015) -----	51

Tab. 4-11	Indikatoren zur Bewertung der Pfadabhängigkeit und Reaktionszeit für die Technologiegruppe „Biochemische Biomassekonversion, Konversionspfad: „Biogasanlage“ -----	52
Tab. 4-12	Indikatoren zur Bewertung der Pfadabhängigkeit und Reaktionszeit für die Technologiegruppe „Thermo-chemische Konversion, Konversionspfad: Biomassevergasung mit thermo-chemischer KWK-Nutzung“ -----	53
Tab. 4-13	Indikatoren zur Bewertung der Pfadabhängigkeit und Reaktionszeit für die Technologiegruppe „Hybride Bioraffinerie, Konversionspfad: SynBioPtx-Konzept -----	53
Tab. 4-14	Abhängigkeit des Technologiefeldes Bioenergie von Infrastrukturen -----	54

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1-1	Übersicht grundlegender Konversionspfade und Einzeltechnologien zur Konversion von Biomasse-----	13
Abb. 1-2	Vereinfachte Prozesskette für die anaerobe Fermentation (Biogas) -----	15
Abb. 1-3	Vereinfachte Prozesskette für die Biomasseverbrennung mit anschließender Kraft-Wärme-Kopplung -----	17
Abb. 1-4	Vereinfachte Prozesskette für die Biomassevergasung mit anschließender Kraft-Wärme-Kopplung -----	18
Abb. 1-5	Verfahrenskonzept der mehrstufigen hydrothermalen Verflüssigung -----	19
Abb. 1-6	Übersicht verschiedener Konversionspfade im Zusammenspiel zwischen klassischen Konversionsverfahren und erneuerbarem Strom-----	19
Abb. 1-7	Vereinfachte Prozesskette für die physikochemische Methanolsynthese aus biogenem CO ₂ und der Einkopplung von Elektrolysewasserstoff „SynBioPtX-Methanol“ -----	20

Zusammenfassung (Steckbrief)

Technologiefeld Nr. 1.1 Bioenergie				Deutsches Biomasseforschungszentrum DBFZ <small>gemeinnützige GmbH</small>				
A) Beschreibung des Technologiefeldes und F&E-Bedarf								
Beschreibung des Technologiefeldes								
Bioenergie bestehend aus 3 Technologiegruppen: – A Biochemische Konversion: Anaerobe Fermentation zu Ethanol A1, Biogas A2 – B Thermochemische Konversion: Verbrennung B1, Vergasung B2 und Hydrothermale Prozesse B3 – C Physikochemische Konversion: Physikalische Aufbereitung C1, katalytische Konversion C2								
Technologische Reife: Praxisanlagen in allen Technologiegruppen, einzelne Komponenten Grundlagenforschung bis Kommerzialisierung (TRL 1 bis 9)								
Kritische Komponenten: Vergasungsreaktoren, Verbrennungsaggregate, Verbrennungsmotoren, Anlagen zur Abgasnachbehandlung, Anlagensteuerung, Speicherkomponenten für Intermediate								
Entwicklungsziele								
– A: Steigerung der Kohlenstoffnutzungseffizienz und Prozessflexibilisierung (Biochemische Konversion) – B: Prozessflexibilisierung und Emissionsminderung (Thermochemischen Konversion) – C: Verbreiterung der Rohstoffbasis und Einbindung von H ₂ (SynBioPtx-Konzepte)								
Entwicklung in den Sektoren Strom, Wärme, Kraftstoffe über alle Technologiegruppen								
Sektor		Einheit	2015	2020	2030	2040	2050	
Ausbau- pfad Deutsch- land	Strom	Kapazität	[GW]	6,5	12,9	21,6	32,6	49,6
		Arbeit	[TWh]	49	84	119	147	174
	Wärme	Kapazität	[GW]	33	35,2	28,1	27,1	25,8
		Arbeit	[TWh]	132	123	84	68	52
	Kraft- stoff	Kapazität	[GW]	5	14,3	25,7	32,4	35,5
		Endenergie	[TWh]	35	115	206	260	284
Vollast- stunden	Strom	Vbh	[h]	7.500	6.500	5.500	4.500	3.500
	Wärme	Vbh	[h]	4.000	3.500	3.000	2.500	2.000
	Kraft- stoff	Vbh	[h]	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000
Potenzialzahlen basieren auf der Studie <i>Meilensteine 2030</i> . Die Potenziale für Strom und Wärme sowie Kraftstoffe bilden getrennte Maximalwerte ab, da in der Studie für beide Verwertungswege separate Prioritäten berechnet wurden. Die Zahlen sind also nicht kumulativ konsistent.								
F&E-Bedarf								
– Konzepte für die hochflexible und gleichzeitig hocheffiziente Bereitstellung von Strom- und Wärme – Einbettung von Bioenergieanlagen in multivalente Versorgungssysteme und deren Steuerung – Effizienzsteigerung zur Ausnutzung knapper Rohstoffpotenziale, insbesondere Rest- und Abfallstoffe – Erforschung kosteneffizienter Emissionsminderungstechnologien und Überführung in die Praxis – Verknüpfung mit Bioökonomiekonzepten und CO ₂ -Bereitstellung für Kohlenstoffkreislaufwirtschaft								

B) Multikriterielle Bewertung
Beitrag zu Klimazielen und weiteren Emissionsminderungszielen
<ul style="list-style-type: none"> – Gegenüber Referenztechnologie sehr hohe Einsparung von THG (50-70 % von 2020-2050) – Zielkonflikt: Emission von CO, Ruß, NO_x und Feinstäuben bei Verbrennungstechnologien
Beitrag zur Energie- und Ressourceneffizienz
<ul style="list-style-type: none"> – Direkte Substitution von fossilen Energieträgern möglich (Biomethan, Biodiesel, Biofestbrennstoffe) – In Bioökonomiekonzepten können Technologien zur Energieerzeugung integriert werden
Kosteneffizienz
<ul style="list-style-type: none"> – Hauptkostenfaktor für die spezifischen Endenergiekosten sind die Kosten der Einsatzstoffe, wobei die Kosten für Anbaubiomasse an Agrar- und Forstmärkte gekoppelt sind. Abfall- und Reststoffe verursachen vor allem durch Logistik und Konditionierung Aufwendungen – Kostensenkungspotenzial für einzelne Komponenten ist gegeben, durch zunehmende Komplexität ist aber das Kostensenkungspotenzial für die bereitgestellte Endenergie gering
Inländische Wertschöpfung
<ul style="list-style-type: none"> – Inländische Wertschöpfung kann von heute 9,9 Mrd. € auf ca. 11,0 Mrd. € in 2030 und 14,4 Mrd. € in 2050 steigen (nach <i>Meilensteine 2030</i> Szenario BAU-B – Strom-Wärme-Priorisierung) – Für Anbaubiomassen ergeben sich neben den direkten wirtschaftlichen Impulsen im Energiebereich zusätzliche Effekte in der Land-, Forst-, Rest- und Abfallwirtschaft
Stand und Trends von F&E im internationalen Vergleich
<ul style="list-style-type: none"> – Basistechnologien sind grundsätzlich ausgereift und am Markt etabliert – nationaler F&E-Fokus auf Systemintegration, Sektorkopplung und Emissionsminderung – Durchschnittlich ca. 71 Mio. € (Mittel von 2010 bis 2015) für Bioenergieforschung in Deutschland
Gesellschaftliche Akzeptanz
<ul style="list-style-type: none"> – Risiko für Marktakzeptanz korreliert mit der langfristige Ausrichtung des regulatorischen Rahmens – Risiko lokaler Akzeptanz bei verschiedenen Anbaubiomassen (indirekt mit Technologien korreliert)
Unternehmerisch-technische Pfadabhängigkeit und Reaktionsfähigkeit
<ul style="list-style-type: none"> – kleinskalige Anlagen unterliegen sehr kurzen Planungs- und Umsetzungszeiten (< 3 Monate) – Mittel- und großskalige Anlagen beanspruchen 12 bis 36 Monate.
Abhängigkeit von Infrastrukturen
<ul style="list-style-type: none"> – Bioenergietechnologien sind im kleinskaligen Maßstab weitestgehend infrastrukturunabhängig. – Mittel- und großskalige Anlagen sind an Leitungsnetze für Strom, Wärme, Gas sowie bei der Biomasselogistik auf das Verkehrswegenetz angewiesen
Systemkompatibilität
<ul style="list-style-type: none"> – Bioenergieanlagen sind innerhalb eines Sektors sehr gut mit den bestehenden Systemen der Strom- und Wärmeversorgung kompatibel. Biomassebasierte Flexibilitätsoptionen bieten eine Möglichkeit zur Systemintegration von fluktuierenden erneuerbaren Energien im Stromsektor durch die bedarfsgerechte Bereitstellung von Residuallast. Biogene Kohlenstoffquellen bilden eine ideale Schnittstelle zur Erzeugung synthetischer Kohlenwasserstoffe auf Basis von Elektrolysewasserstoff.

1 Beschreibung des Technologiefeldes Bioenergie

Das Technologiefeld Bioenergie wird im Folgenden zuerst allgemein strukturiert und abgegrenzt. Anschließend werden ausgewählte Technologiegruppen beschrieben und anhand ausgewählter Beispielschnitten detaillierter dargestellt.

1.1 Allgemeine Beschreibung und Struktur der Bioenergie in Deutschland

Bioenergie leistet in Deutschland aktuell einen wesentlichen Beitrag zur Versorgung mit erneuerbaren Energien (EE) in den drei Sektoren Strom, Wärme und Verkehr. Für das Jahr 2015 stellen sich die Anteile für den Beitrag der Bioenergie wie in Tab. 1-1 dar (BMWi 2016a). Bioenergie leistet dabei vor allem im Verkehrssektor relativ zu den anderen EE einen wesentlichen Beitrag zur Bereitstellung. Im Strom- und Wärmebereich stellt Bioenergie ca. ein Fünftel bzw. vier Fünftel der erneuerbaren Energiemengen bereit.

Tab. 1-1 Beitrag der Bioenergie zur Energiewende für das Bezugsjahr 2015

	Einheit	Strom	Wärme	Verkehr
Endenergiebedarf	[TWh]	595	1.193	634
Erneuerbare Energien	[TWh]	187	159	34
Anteil Erneuerbarer Energien	[%]	31,5	13,3	5,3
Bioenergie	[TWh]	43	30	31
Anteil Bioenergie am Endenergiebedarf	[%]	7,2	4,7	4,9
Anteil Bioenergie an Erneuerbaren Energien	[%]	22,8	79,1	89,0

Quelle: BMWi (2016a)

Perspektivisch wird sich der absolute Beitrag der Bioenergie zum Ausbau der EE nur noch geringfügig steigern lassen, da im Gegensatz zur Wind- und Solarenergie ein Großteil der nachhaltig erschließbaren Potenziale bereits in Nutzung sind (Pieprzyk et al. 2016). Insgesamt können in Deutschland langfristig und nachhaltig 8 bis 12 Prozent des heutigen und 11 bis 15 Prozent des erwarteten Primärenergiebedarfs im Jahr 2020 gedeckt werden (Deutscher Bundestag 2009). Die Bedeutung der Bioenergie wird künftig verstärkt darin liegen, bestimmte Schlüsselfunktionen für den Transformationsprozess des Energiesystems zu übernehmen (Thrän et al. 2015a) – hier vor allem durch eine bedarfsgerechte Bereitstellung von Energie und hochkalorischen sowie gut lager- und transportierbaren Energieträgern mit geringem Carbon-Footprint. Die aktuelle moderne Bioenergiebereitstellung muss dafür zu einer integrierten Bioenergieerzeugung weiterentwickelt werden. Die Mitgliedsinstitute des FVEE arbeiten hierzu an verschiedenen Lösungsansätzen. Ein Konzept, welches vom DBFZ entwickelt wurde und von vielen weiteren Institutionen verfolgt wird, ist das Konzept „Smart Bioenergy“ (Thrän 2015). Das Ziel ist die Entwicklung und Umsetzung von Nutzungspfaden und Technologien, um die Bioenergie an allen drei Dimensionen des energiepolitischen Zieldreiecks (Versorgungssicherheit, Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit) auszurichten.

Bioenergie ist sowohl hinsichtlich der eingesetzten Rohstoffe, wie den verwendeten Konversionstechnologien als auch den möglichen Endenergieformen oder Energieträgern sehr heterogen.

Um die unterschiedlichen Bioenergietechnologien zu strukturieren, sollen im Rahmen dieser Ausarbeitung vor allem Konversionspfade differenziert werden. Für einzelne Kriterien werden abweichend davon auch sektorale Zuordnungen erfolgen, wenn diese die geeignetere Aggregationsebene darstellen. Das Technologiefeld Bioenergie gliedert sich in drei grundsätzliche Konversionspfade, wobei diese Zuordnung nicht immer trennscharf ist, da in der Praxis auch eine Verkettung von verschiedenen Technologiegruppen zu finden ist (Abb. 1-1). Die Konversionspfade unterscheiden sich nicht nur in den Umwandlungsmöglichkeiten (biochemisch, physikalisch-chemisch und thermo-chemisch), sondern auch durch die vorzugsweise nutzbaren Rohstoffe (Abbaubarkeit, Gehalt an Fettsäuren, Heizwert). Während gegenwärtig alle drei Konversionspfade nennenswert zur Bioenergiebereitstellung beitragen, ist insbesondere die Rohstoffbasis für die physikalisch-chemisch Konversion (Pflanzenöl, öl- und fetthaltige Reststoffe und Abfälle) künftig vergleichsweise unsicher, da im Rahmen der Novelle der Erneuerbaren Energien-Richtlinie der EU-Kommission möglicherweise diese Rohstoffe stärker als bisher reguliert werden (EC 2017). Auch die alternative Bereitstellung dieser Biomassen auf Algenbasis wird für rein energetische Zwecke nur eingeschränkt als Option gesehen (Kröger und Müller-Langer 2012). Gleichzeitig können sich aber für Konversionspfade, in denen angereichertes CO₂ als Nebenprodukt anfällt, besondere Möglichkeiten für die Bereitstellung von Energieträgern auf Basis von regenerativem Strom bieten.

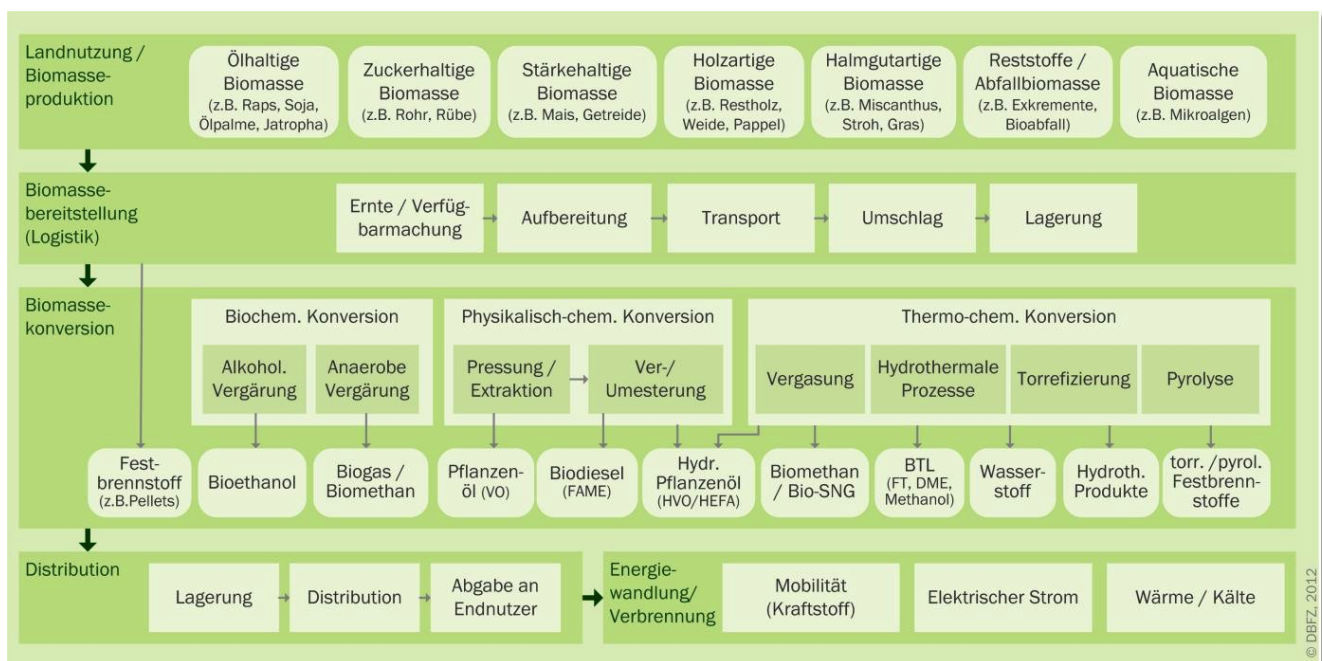


Abb. 1-1 Übersicht grundlegender Konversionspfade und Einzeltechnologien zur Konversion von Biomasse

Quelle: DBFZ (2012)

Aktuell und in Zukunft tragen vor allem KWK-Systeme und hochintegrierte Raffineriekonzepte zur effizienten Bioenergiebereitstellung bei, da durch die gekoppelte Strom- und Wärmeproduktion bzw. eine starke Prozessintegration hohe Gesamtnutzungsgrade erzielt werden können. Daher sollen die folgenden drei forschungsseitig relevanten Konversionspfade im Fokus stehen:

- Biochemische Biomassekonversion, Konversionspfad: Anaerobe Fermentation mit KWK-Nutzung (motorisch, Brennstoffzelle)
- Thermo-chemische Konversion, Konversionspfad: Biomassevergasung mit KWK-Nutzung (motorisch, Brennstoffzelle)
- Hybride Bioraffinerie, Konversionspfad: SynBioPtX-Konzept

Die Betrachtung von Technologien zur Nutzung von Klär- und Deponiegas und der organischen Fraktionen der Restmüllentsorgung erfolgt explizit nicht, auch wenn die bereitgestellte Energie aus diesen Rohstoffen der Bioenergie zugerechnet wird. Der Hintergrund dafür ist, dass Klär- und Deponiegase im Entsorgungsbereich vorrangig mit dem Ziel eingesetzt werden entstehende Methanemissionen zu vermeiden bzw. prozesstechnisch sinnvoll sind und die Energieproduktion dabei nicht im Vordergrund steht. Weiterhin wird auch die Verknüpfung von Bioenergie und CCS (BECCS) nicht betrachtet, da CCS-Technologien im *Technologiebericht 2.3: CO₂-Abscheidung und Lagerung (CCS)* abgedeckt werden und der Einsatz von BECCS als eine für Deutschland wenig relevante Technologieoption betrachtet wird (Sternner und Bauer 2016).

1.2 Technologiebeschreibung „Biochemische Biomassekonversion“, Konversionspfad: Anaerobe Fermentation mit motorischer KWK-Nutzung

Die Technologiegruppe „Biochemische Biomassekonversion“ umfasst sämtliche Konversionstechnologien, die im Kern auf mikrobiologischen Vergärungsprozessen basieren. Hierzu zählen folgende anaerobe Prozesse: die alkoholische Fermentation zur Produktion von Bioethanol, Fettsäurefermentation (als Vorstufe der Biogasproduktion), anaerobe Fermentation (Biogas, wie in Abb. 1-1), sowie die biologische Methanisierung (hydrogenotrophe Methanogenese), welche detailliert im separaten Bericht für das *Technologiefeld 4.2b: Power-to-gas (Methanisierung biologisch)* beschrieben wird. Aktuell hat vor allem die alkoholische Fermentation und die anaerobe Fermentation (Biogas) die größte Bedeutung bei der Bereitstellung von Bioenergie.

Die alkoholische Fermentation wird in großem Umfang zur Produktion von Bioethanol als Biokraftstoff eingesetzt. Als Rohstoff dienen Zucker- oder stärkehaltige Rohstoffe oder auch Lignocellulose-Rohstoffe, welche durch eine vorgeschaltete Aufbereitung in Zucker umgesetzt wurden. Ausgangsprodukt für die Fermentation ist Zucker, der von Hefen zu Alkohol vergoren wird. Im Anschluss wird destilliert und gereinigt. Als Endprodukt wird der Bioethanol in Deutschland vor allem zur Beimischung in Otto-Kraftstoffen eingesetzt (ca. 29 % des gesamten Biokraftstoffumsatzes in Deutschland 2015 (FNR 2016)). Mit dem bei der Produktaufreinigung anfallenden CO₂ bietet die alkoholische Fermentation zu Bioethanol einen interessanten Basis-

prozess für die integrierte Bereitstellung von Kraftstoffen aus Biomasse und Strom und wird in Kapitel 1.4 näher betrachtet.

Die anaerobe Vergärung zu Biogas ist eine Technologie, die in Deutschland vor allem zur Umsetzung von relativ wasserhaltigen Biomassen eingesetzt wird. Das Spektrum nutzbarer Biomassen reicht dabei von den unterschiedlichsten Fraktionen wasserhaltiger organischer Rest- und Abfallstoffe über Landwirtschaftliche Nebenprodukte wie Gülle oder Mist bis hin zu Anbaubiomasse, z. B. in Form von Maissilage. Die anaerobe Fermentation erfolgt durch die Beteiligung einer Vielzahl von Mikroorganismen und wandelt Kohlenhydrate, Fette und Eiweiße in ein Gasgemisch, das in veränderlichen Anteilen überwiegend aus Methan und Kohlendioxid besteht. Neben diesen Hauptbestandteilen enthält das Rohgas aus der Fermentation auch Wasserstoff, Schwefelwasserstoff, Wasserdampf und andere Spurengase. Das Rohgas wird in Deutschland vor allem zwei Nutzungswegen zugeführt.

Der erste und häufigste Weg ist die motorische Nutzung des grob gereinigten Biogases in Blockheizkraftwerken (BHKW), um ortsnahe Strom- und Wärme zu erzeugen. Als weitere Option besteht die Möglichkeit das Biogas einem Trennverfahren zu unterziehen, um Biomethan zu erzeugen, das als Erdgassubstitut ins Gasnetz eingespeist werden kann. Biomethan, das in seinen Eigenschaften dem Erdgas gleicht, kann den unterschiedlichsten Verwendungen zugeführt werden. Das abgetrennte CO_2 kann perspektivisch in elektro-chemischen Konversionsprozessen genutzt werden. Beide Konversionspfade sind schematisch in Abb. 1-2 dargestellt.

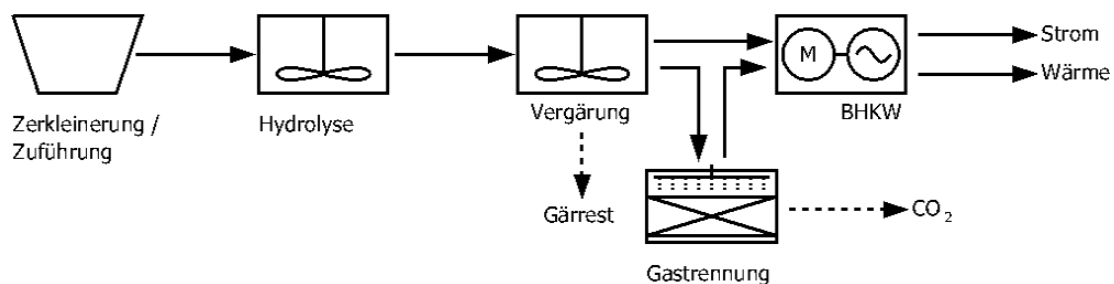


Abb. 1-2 Vereinfachte Prozesskette für die anaerobe Fermentation (Biogas)

Quelle: DBFZ (2017)

Als beispielgebender Konversionspfad für diese Technologiegruppe wurde die anaerobe Biogasfermentation mit direkter motorischer Gasnutzung in einem Blockheizkraftwerk ausgewählt, da diese Art der Anlagenkonfiguration die biomassebasierte Stromerzeugung in Deutschland mit knapp 8.000 Anlagen sowohl in Bezug auf die installierte Leistung als auch die erzeugte elektrische Arbeit dominiert (Dotzauer et al. 2016). Im Detail stellen diese Anlagen zusammen mit den BHKWs, die Biomethan verstromen, die bis auf den zusätzlichen Konversionsschritt der Gasaufbereitung auf den gleichen Technologien basieren, über 73 % des Stroms aus Biomasse bereit (eigene Berechnung nach BMWi 2016a). Trotz Verschlechterung der Förderbedingungen über das EEG bieten sich perspektivisch Chancen für Biogasanlagen in der flexiblen Strom- und Wärmebereitstellung und bei einer Aufreinigung von Biogas zu Biomethan als flexiblen Brennstoff. Durch einen verstärkten Einsatz von Abfall- und Reststoffen lässt sich die Ökobilanz von Biogasanlagen, die heute überwiegend An-

baubiomasse nutzen, verbessern. So können zusammen mit einer flexiblen Bioenergiebereitstellung gleichzeitig ein systemischer Beitrag zur Energiebereitstellung geleistet und die THG-Emissionen vermindert werden.

Tab. 1-2 Beispieltabelle für techno-ökonomische Kenndaten der Technologiegruppe „Anaerobe Biogasfermentation mit motorischer Nutzung in einem BHKW“

	Einheit	Heute	2020	2030	2040	2050
Durchschnittliche installierte Leistung	kW	340	350	525	613	700
Volllaststunden	h	6.681	4.130	2.753	2.409	2.065
Durchschnittlicher Leistungsquotient	MW	1,3	2,1	3,2	3,7	4,2
Lebensdauer	a	20	25	30	30	30
Investition	€/kW	3.600	3.500	3.300	3.100	2.900
Variable Betriebskosten	ct/kWh	8	8,6	10	11,6	13,5
Stromgestehungskosten	ct/kWh	18-24	12-15	10-13	10-13	10-13

Quelle: Thrän et al. (2015)

1.3 Technologiebeschreibung „Thermo-chemische Konversion“, Konversionspfad: Biomassevergasung mit motorischer KWK-Nutzung

Technologien zur thermochemischen Konversion setzen wasserarme Biomassen um, vor allem forstliche Biomassen oder trockene Nebenprodukte und Reststoffe aus dem Agrar- oder Abfallbereich, die gegebenenfalls mechanisch-physikalisch (z. B. Zerkleinern, Mischen, Kompaktieren) oder thermo-chemisch (z. B. Torrefizierung) vorbehandelt wurden. Eine Ausnahme bildet der Konversionspfad der hydrothermalen Karbonisierung, die auf Grund der Umsetzung in wässriger Phase auch für wasserhaltige Biomassen geeignet ist und als Produkt kohleähnlichen Festbrennstoff liefert. Die „thermo-chemische Konversion“ ist hauptsächlich durch hohe Prozesstemperaturen gekennzeichnet. Die Prozesse laufen unter Sauerstoffbeteiligung, partieller Sauerstoffzufuhr als auch Sauerstoffabschluss ab. Beispielgebend seien dazu hier die Prozesse Verbrennung, Vergasung, Torrefizierung und die hydrothermale Karbonisierung genannt. Eine im deutschen Stromsektor dominierende Technologie ist die in Abb. 1-3 schematisch dargestellte Option eines Kondensationskraftwerks mit Biomassefeuerung, häufig in Multimegawattanlagen umgesetzt. Da diese Technologie fossil befeuerten Anlagen sehr ähnlich und bereits sehr weit entwickelt ist, wird sie hier nur kurz betrachtet (Tab. 1-3).

Mittels einer thermo-chemischen Konversion der Biomassen unter partieller Sauerstoffbeteiligung bzw. Sauerstoffabschluss lassen sich heizwertreiche Energieträger herstellen, die wiederum einer thermo-chemischen KWK-Nutzung (in Motoren oder Brennstoffzellen) zugeführt werden können. Diese Technologie soll im Folgenden als Konversionspfad mit Innovationsentwicklungspotenzial beschrieben werden.

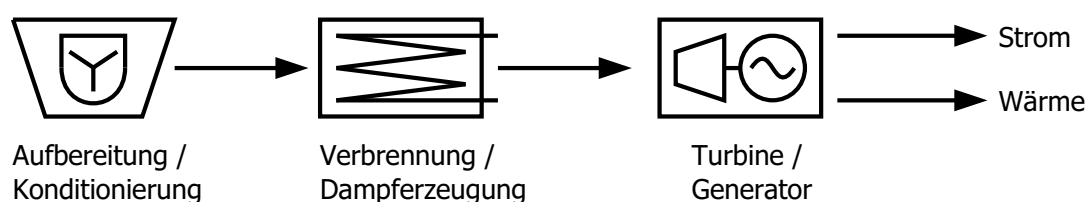


Abb. 1-3 Vereinfachte Prozesskette für die Biomasseverbrennung mit anschließender Kraft-Wärme-Kopplung

Quelle: DBFZ (2017)

Tab. 1-3 Beispieltabelle für techno-ökonomische Kenndaten des Konversionspfades „Thermo-chemische Konversion“ am Beispiel einer Dampfkesselanlage mit Turbinengetriebenem Generator

	Einheit	Heute	2020	2030	2040	2050
Mittlere installierte elektrische Leistung	kW	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000
Volllaststunden	h	6.500	6.000 - 5.000	3.000 – 5.000	3.000 – 5.000	3.000 – 5.000
Durchschnittlicher Leistungsquotient	-	-	-	-	-	-
Lebensdauer	a	20+	20+	20+	20+	20+
Investition	€/kW	-	-	-	-	-
Variable Betriebskosten	ct/kWh	-	-	-	-	-
Stromgestehungskosten	ct/kWh	23,04	22,34	19,77	16,18	14,58

Quelle: Thrän et al. (2015)

Bei der Biomassevergasung zur anschließenden thermo-chemischen KWK-Nutzung wird wie in Abb. 1-4 dargestellt die Biomasse zuerst in Brenngas konvertiert und anschließend in einem BHKW (Motor oder Brennstoffzelle) in Strom und Wärme gewandelt. Diese Technologie kommt vor allem im unteren und mittleren Leistungsbe- reich zum Einsatz. Gegenüber biomassebefeuelten Kondensationskraftwerken ist diese Technologie eher für lastvariable Anwendungen geeignet, da sich die eingesetzten Blockheizkraftwerke vergleichsweise gut steuern lassen und sich die relativ kom- paktten Vergasungsreaktoren auf Grund der geringen thermischen Trägheit im Prin- zip besser modulieren lassen, wenngleich für eine erfolgreiche Umsetzung der Flexi- bilisierung in der Praxis noch Forschungsbedarf besteht.

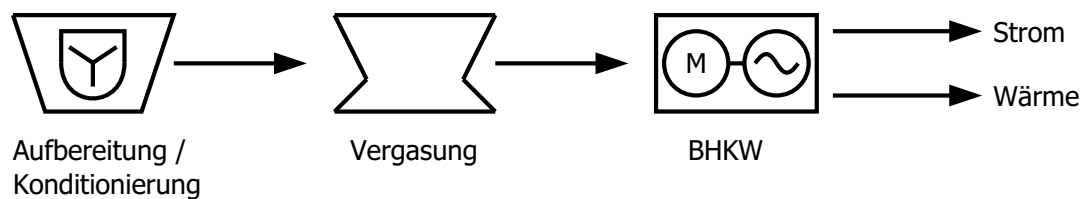


Abb. 1-4 Vereinfachte Prozesskette für die Biomassevergasung mit anschließender Kraft-Wärme-Kopplung

Quelle: DBFZ (2017)

Je nach Anwendungsfall haben aber beide Technologien ihre spezifischen Vorzüge und auch Nachteile, weshalb bei der Anwendung des Kriterienrasters (Teilbericht 1) bedarfsweise auch auf beide Konversionspfade Bezug genommen wird.

Weiterhin ist zu beachten, dass die thermo-chemische Biomassekonversion die bedeutendste Technologie zur reinen Wärmeerzeugung aus Biomasse darstellt, wobei hier unterschiedliche Konzepte zur Verbrennung von unterschiedlichen Biomassen eine Rolle spielen. In Deutschland sind in diesem Bereich vor allem Feuerungsanlagen im kleinen und mittleren Leistungsbereich von Bedeutung.

Tab. 1-4 Beispieltabelle für Techno-ökonomische Kenndaten der Technologiegruppe „Thermo-chemische Konversion“ mit dem Konversionspfad: Biomassevergasung und motorischer Nutzung in einem BHKW

	Einheit	Heute	2020	2030	2040	2050
Durchschnittliche installierte Leistung	kW	29	1.000	1.000	1.000	1.000
Volllaststunden	h	-	-	-	-	-
Durchschnittlicher Leistungsquotient	MW	-	-	-	-	-
Lebensdauer	a	20	20	20	20	20
Investition	€/kW	-	-	-	-	-
Variable Betriebskosten	ct/kWh	-	-	-	-	-
Stromgestehungskosten	ct/kWh	29,23	26,41	23,04	18,17	16,72

Quelle: Thrän et al. (2015)

Thermo-chemische Verfahren können auch genutzt werden, um schwer zugängliche Biomassen in definierte Zwischenprodukte zu überführen (z. B. hydrothermale Karbonisierung oder Torrefizierung), die dann z. B. auch in Kraftstoffe oder andere kohlenwasserstoffbasierte Produkte überführt werden können. Beispielhaft ist ein solches Konzept in Abb. 1-5 dargestellt. Vorteile in diesen neuen Verfahren werden insbesondere darin gesehen, bislang ungenutzte nasse und wasserreiche biogene Rest- und Abfallstoffe (z. B. Grünschnitt, Industrieschlämme, Klärschlamm) zu nutzen und gleichzeitig ein Kraftstoffspektrum zu erzeugen, das nicht den Umweg über Synthese und durch extern zuzuführenden Wasserstoff für die weitere Kraftstoffaufbereitung gehen muss. Weil jedoch in diesem Bericht der Fokus auf den Möglichkeiten zur

Strombereitstellung aus Biomasse liegt, wird dieses Konzept nicht im Detail betrachtet.

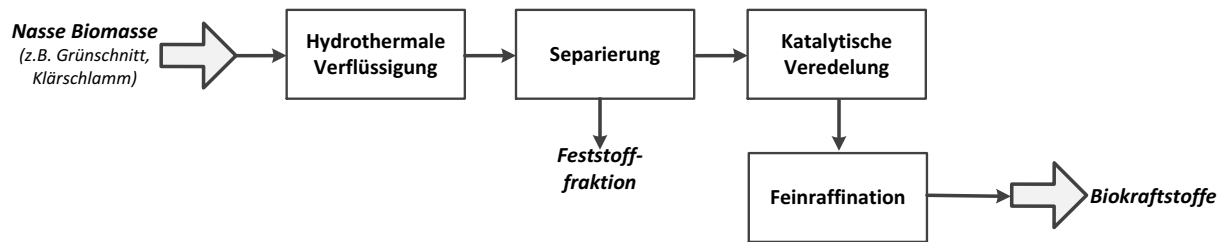


Abb. 1-5 Verfahrenskonzept der mehrstufigen hydrothermalen Verflüssigung

Quelle: DBFZ (2017)

1.4 Technologiebeschreibung Hybrid-Bioraffinerie-Konversionspfad: Konzept für Synergien aus Bioenergie und Power-to-X (SynBioPtX-Konzept)

In Hinblick auf die angestrebte Integration von Bioenergie bzw. der entsprechenden regenerativen Kohlenstoffquellen in eine auf erneuerbare Ressourcen basierende Energiebereitstellung werden gegenwärtig verschiedene Umwandlungsoptionen diskutiert (DECHEMA e.V. 2016).

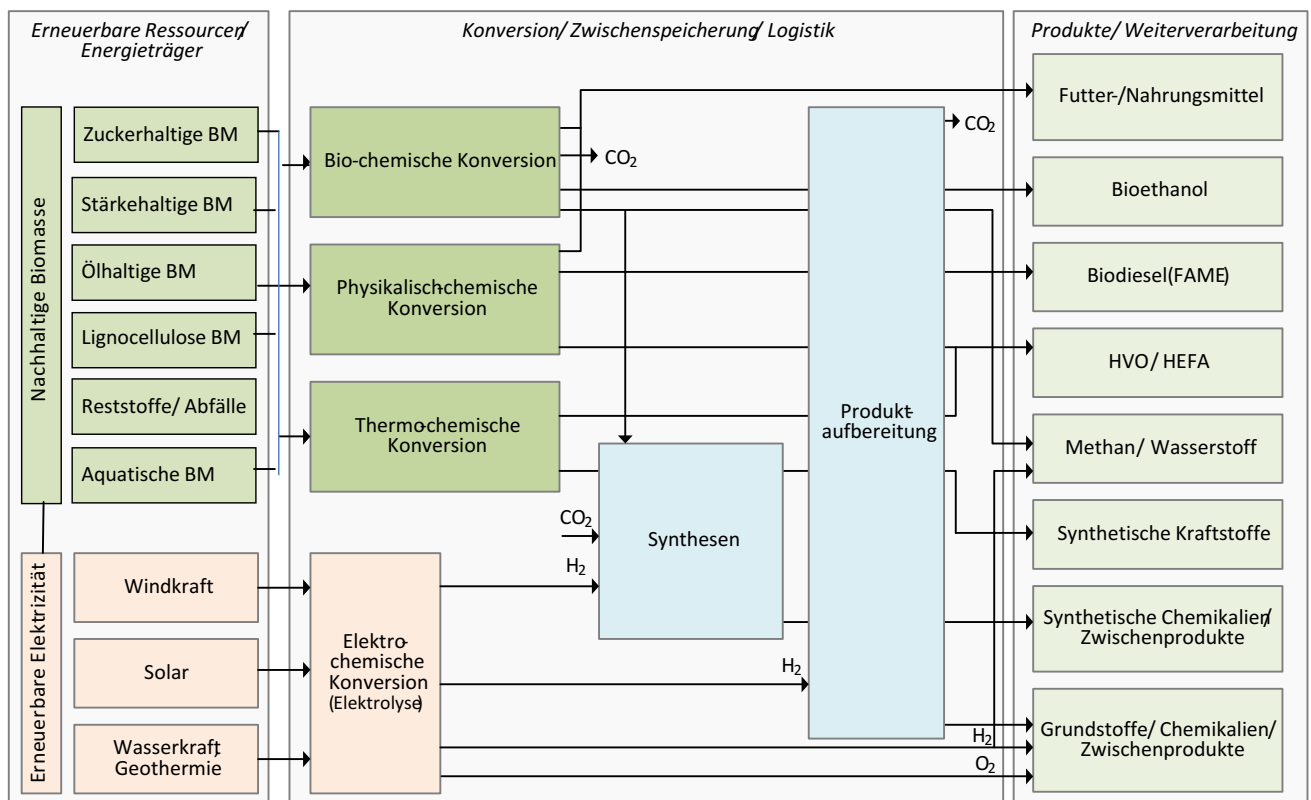


Abb. 1-6 Übersicht verschiedener Konversionspfade im Zusammenspiel zwischen klassischen Konversionsverfahren und erneuerbarem Strom

Quelle: DBFZ (2017)

Sie befinden sich in unterschiedlichen Reifegraden und sind auch für das künftige Energiesystem unterschiedlich relevant. Entscheidend für die hybriden Technologiekonzepte sind aus heutiger Sicht (1) Nutzung von nachhaltig verfügbaren biogenen Rohstoffen, (2) Bereitstellung von Bioenergieträgern, die in die existierenden Infrastrukturen integriert werden können und daher Brückenfunktionen ausüben und (3) die Erzeugung nennenswerter und angereicherter CO_2 -Ströme als Nebenprodukt, die in der Bereitstellung strombasierter Energieträger eingesetzt werden können. Weil diese Systeme bisher nicht etabliert sind, wird nachfolgend ein Konzept stellvertretend dargestellt.

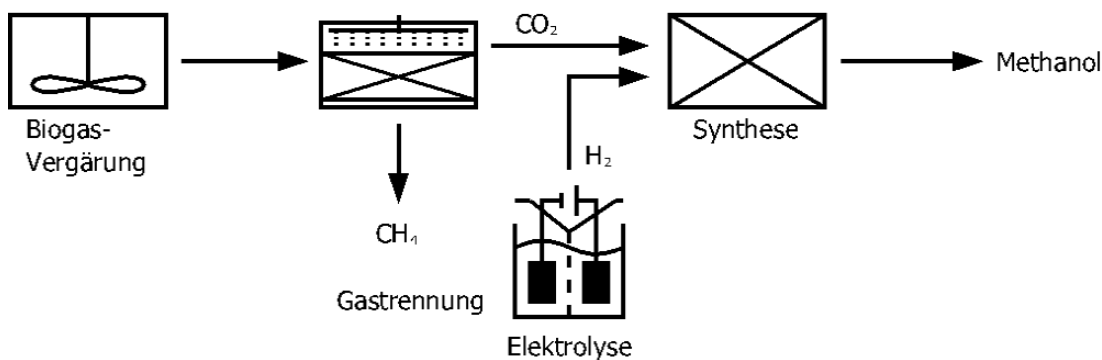


Abb. 1-7 Vereinfachte Prozesskette für die physikochemische Methanolsynthese aus biogenem CO_2 und der Einkopplung von Elektrolysewasserstoff „SynBioPtX-Methanol“

Quelle: DBFZ (2017)

Um diesen Konversionspfad anhand eines konkreten Beispiels zu beurteilen, wurde wie in Abb. 1-7 dargestellt die Prozesskette „SynBioPtX-Methanol“ ausgewählt, wobei die Erzeugung von Elektrolysewasserstoff als Input für die Synthese von Methanol aus biogenem CO_2 genutzt wird. Als geeignete biogene CO_2 -Quelle kommen Konversionspfade in Frage, die sich durch einen hohen CO_2 -Gehalt, ein hohes punktuelltes Aufkommen sowie durch die Abwesenheit von Störstoffen wie Katalysatorgiften auszeichnen. Als Beispiel wurde als CO_2 -Quelle das Abgas der Gasseparation einer Biomethananlage ausgewählt, da hier bei bestimmten Aufbereitungsverfahren hohe CO_2 -Konzentrationen und sehr niedrige Spurengasgehalte vereinen (Beil et al. 2016). Vergleichbare Stoffströme werden auch bei der Bioethanolbereitstellung generiert.

2 Stand F&E in Deutschland

Die Darstellung des Stands der Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten (F&E) erfolgt differenziert nach den drei Konversionspfaden, wobei in Einzelfällen auch die speziell ausgewählten Konversionspfade betrachtet werden.

Für diejenigen Technologien, die schon in der Vorgängerstudie „Energietechnologien 2050“ (Wietschel et al. 2010) bewertet wurden, erfolgt zudem ein Rückblick auf die letzten zehn Jahre. Hier werden insbesondere neue technologische Entwicklungen der vergangenen Jahre, die bereits auf die getroffenen energiepolitischen Leitentscheidungen zurückzuführen sind, identifiziert, diskutiert und bewertet. Diese Analyse orientiert sich an folgenden Fragestellungen: Welche Fortschritte wurden seit 2005 erzielt? Welche innovativen Entwicklungen zeichnen sich ab und werden aktuell verfolgt? Wie ist das Innovationspotenzial insgesamt zu bewerten? Was befindet sich noch in der Entwicklungspipeline?

Übergreifende Bezüge zur Digitalisierung

Eine Zunahme dezentraler fluktuierender Einspeisung macht eine aktive, automatisierte Steuerung des Energiesystems erforderlich. Die steigenden Datenmengen können nur mit IKT effizient verarbeitet, zwischen den Systemkomponenten übertragen, gefiltert, verdichtet und akteurs- und anwendungsgerecht aufbereitet werden. IKT fördert so die Kosteneffizienz und ermöglicht zeitgerechte Abläufe und Entscheidungen. Hier braucht es jedoch noch konkrete und anwendungsspezifische Lösungen wie z. B. RegModHarz (Fraunhofer IWES 2012) oder Kombikraftwerk (Knorr et al. 2014). So muss je nach Ebene entschieden werden, wo eine digitale Vernetzung sinnvoll ist. Energie ist eine systemkritische Infrastruktur, so sollten auch autonome und selbstlaufende Teilkomponenten vorhanden sein.

Über die Konversionspfade hinweg bestand und besteht daher Forschungsbedarf im Bereich Digitalisierung. Konkret bedeutet dies: Digitalisierung/IKT im Bereich: Energiegewinnung und -vermarktung (erzeugungsgeführte Flexibilisierung der Prozesse, detailliertere Prognose von Verbräuchen und Einspeisungen, Fahrplanmanagement, Geschäftsmodelle/digitale Vertriebskanäle, automatisierte Steuerung etc.); Energieverteilung (z. B. Netzplanung, Netzmanagement, -kapazität); Energienutzung (intelligente Energienetze auf Basis von smart grids, intelligente Messsysteme: Smart Meter etc., Energie-Apps, Lastmanagement, gezielte Nutzung von Abwärme etc.); Datenschutz und -sicherheit (EWE AG 2014).

2.1 Biochemische Biomassekonversion, Konversionspfad: Anaerobe Fermentation mit motorischer KWK-Nutzung

Anaerobe biochemische Konversionsprozesse sind die Basis für viele biotechnologische Verfahren, die zur Bereitstellung von Energieträgern (z. B. Biogas, Ethanol) und stofflich genutzten Materialien eingesetzt werden. Im Bioenergiebereich tragen die Sektoren Biogas und Biomethan den maßgebend größten Anteil zur Stromerzeugung aus EE bei (BMWi 2017). Im Jahr 2015 entfielen 33 TWh auf die Stromerzeugung, 19 TWh auf die Wärmenutzung sowie 0,5 TWh auf den Verkehrsbereich. Biogas gilt als etablierte Technologie mit notwendigen Optimierungs- und Neuausrichtungsbedarf.

Mit den starken Einschnitten bei der Förderung von Biogas im EEG, steigenden Nachhaltigkeitsanforderungen, einer perspektivischen Sektorenkopplung und der Option zukünftig auch die stoffliche Nutzung der Biogasvergärung zu forcieren, steht der Sektor vor großen Herausforderungen. Ein großes aktuelles und zukünftiges Potenzial liegt insbesondere darin, dass Biogas als speicherbares gasförmiges Konversionsprodukt flexibel zum Ausgleich fluktuierender erneuerbarer Energien aus Wind und Sonne im Stromsektor eingesetzt wird (Hauser et al. 2016).

2.1.1 Aktueller Entwicklungsstand

Mit dem novellierten EEG 2014 traten einschneidende Neuregelungen für die Stromerzeugung aus Biomasse in Kraft. Dies führte zu einem starken Rückgang der Neubauaktivitäten, mit der Ausnahme spezieller Anlagenkonzepte zur Behandlung von Rest- und Abfallstoffen. Der Zubau von Neuanlagen konzentrierte sich ab 2015 vor allem auf Gülle- und Abfallanlagen (Gülle-Kleinstanlagen bis 75 kW_{el} (§27b EEG), Bioabfallanlagen (§27a EEG)). Die Leistung wurde daher überwiegend über Anlagenerweiterungen und Umstellungen auf den flexiblen Anlagenbetrieb bestimmt. Ein Großteil der Biogasanlagen (BGA) konnte in der Vergangenheit kontinuierlich die Wärmenutzung erhöhen und ein Teil der Anlagen durch die Erhöhung der installierten elektrischen Leistung die Flexibilitätsprämie in Anspruch nehmen.

Mit der EEG-Novelle 2017 (EEG 2017) wird die Vergütungshöhe aus Biomasse zukünftig vorrangig über Ausschreibungen ermittelt. Durch diese Neuerungen, die zudem mit bestimmten Mindestvoraussetzungen zur Flexibilisierung verknüpft sind, besteht die klare Zielstellung, den Anlagenbestand in den kommenden Jahren weitgehend zu flexibilisieren.

Vor dem Hintergrund der geringfügigen Neubauaktivität (Thrän et al. 2016a) verlagern sich die Aktivitäten der Anlagenhersteller im Biogasbereich zunehmend ins Ausland (Daniel-Gromke et al. 2014). Dies trifft auch auf den Bereich der Bioabfallvergärung zu (Daniel-Gromke et al. 2014), weil auch hier die Rahmenbedingungen für integrierte Bioabfallvergärungs- und -kompostierungsanlagen derzeit ungünstig sind. Trotz zunehmend verbesserter Sammelsysteme und alternativer Verwertungswege bestehen noch erhebliche bisher ungenutzte Potenziale für eine optimierte stofflich-energetische Verwertung aus Bioabfällen (Raussen et al. 2016). Es wird davon ausgegangen, dass 1 bis 2 Mio. Mg/a Nahrungs- und Küchenabfälle aus dem Restmüll genutzt werden könnten, bis zu 0,8 Mio. Mg/a Kompost, 1,2 TWh/a Biogas sowie 0,4 Mio. Mg/a CO₂-Einsparung resultieren (Knappe et al. 2012). In den letzten Jahren zeichnete sich als eingesetzte Technologie bei der Prozessführung der Anlagen zur Bioabfallvergärung ein Trend hin zur Trockenfermentation ab. Für landwirtschaftliche Biogasanlagen ist die Nassfermentation Stand der Technik und das häufigste Verfahren (Scheftelowitz et al. 2015; Daniel-Gromke et al. 2014).

In den letzten Jahren wurden viele Fortschritte im Biogasbereich aufgrund von Forschungsanstrengungen erreicht. Viele F&E-Ergebnisse finden bereits Anwendung im Markt. Diese sind im Folgenden kurz zusammengefasst:

- Steigerungen der Raumbelastung in der Vergärung
- Steigerung in der Energie- und Gasausbeute durch Strategien in der Vorbehandlung (z. B. mechanischen Aufschluss)
- Optimierung für die gezielte Verwertung im Bereich Reststoff- und Abfallverwertung (Bioabfall, Grünschnitt, tierische Exkremente, gewerbliche Speiseabfälle, industrielle organische Abfälle)
- Repowering von Bestandsanlagen – Maßnahmen zur Effizienzbewertung und -steigerung
- Optimierungslösungen durch Prozessüberwachung (Messtechnische Lösungen zur Prozesskontrolle, Sensorentwicklung, Simulation, Modellierung etc.)
- Emissionsminderung für Methan, Ammoniak, Formaldehyd
- Nutzungskonzepte für die Abwärme von Biogasanlagen mit Vor-Ort-Verstromung
- Flexibilisierungsansätze in der Strombereitstellung aus Biogasanlagen
- Erste Umsetzungen von Biogasanlagen in Bioökonomiekonzepten (kombinierte energetisch-stoffliche Verwertung), z. B. Nutzung von Gärrest als Dünger, Extraktion von Faserstoffen
- Gezielte Beeinflussung der Biogas- und Intermediateproduktion (Einfluss von Prozessparametern auf mikrobielle Gemeinschaft)
- „Dark fermentation“ zur Wasserstoffproduktion

Die Übertragung der Methoden und Konzepte auf großtechnische Prozesse und deren Markteinführung steht zum Teil noch aus. Die Herausforderungen, die aus der zunehmenden Sektorenkopplung, der bedarfsgerechten Bioenergiebereitstellung sowie Digitalisierung und dem EEG 2017 resultieren, generieren zukünftig weiteren Forschungs- und Entwicklungsbedarf.

2.1.2 Künftiger Entwicklungsbedarf

Entsprechend verschiedener Energieszenarien (Nitsch et al. 2012; Fraunhofer IWES und IPB, Ifeu 2015; ISI & Consentec; Öko-Institut, Fraunhofer ISI 2015) wird auch in Zukunft von einem moderaten Anstieg der energetischen Biomassenutzung ausgegangen. Einen Großteil des bisher ungenutzten Ausbaupotenzials stellen die Rest- und Abfallstoffe dar. Dieses Potenzial ist ausbaufähig, aber in Höhe von ca. 448 PJ begrenzt (Brosowski et al. 2015). Die Weiterentwicklung von effizienten Verwertungspfaden ist daher entscheidend. Erhebliche Unterschiede zwischen Rest-/Abfallstoffen und Anbaubiomasse bestehen vor allem im Hinblick auf die eingesetzten Techniken zur Aufbereitung, Umwandlung und Nutzung. Nichtsdestotrotz wird in der energetischen Verwertung von landwirtschaftlichen Substraten (in Biogasanlagen) weiterhin ein großer Beitrag zur Minderung der Treibhausgasemissionen gesehen. Mit Bezug auf den Anbau von Energiepflanzen ist das Ziel einer schonenden Boden-

nutzung und einer Berücksichtigung von Umwelt- und Gewässerschutz besonders zu unterstreichen (Baur et al. 2015; Seyfert et al. 2011; Thrän et al. 2010).

Flexibilisierung der Energiebereitstellung

Ausgehend von den aktuellen ordnungsrechtlichen Bedingungen und den Anforderungen an ein Erneuerbares Energiesystem, liegt der Forschungsschwerpunkt im Bereich anaerobe Verfahren vor allem in der Flexibilisierung der Strombereitstellung, da Biogasanlagen eine der wenigen steuerbaren erneuerbaren Energieformen ist. Die Herausforderung liegt in der Entwicklung von hochflexiblen Anlagenkonzepten hinsichtlich des Energieoutputs bei gleichzeitig hoher Gesamteffizienz. Hierzu gehört die Forschung & Entwicklung in Bereich:

- Prozessüberwachung und -kontrolle für eine Flexibilisierung der Gasproduktion, ein stabiler Betrieb bei wechselnden Raumbelastungen und variierenden Substraten (vorausschauendes Füttern zur bedarfsgerechten Energiebereitstellung)
- Harmonisierung und Kopplung der Informationsflüsse zwischen Dargebots- und Angebots-basierenden EE-Formen
- Systemintegration und Kombination mit anderen Erneuerbaren Energien
- Optimierung durch „Anlagenpooling“ für die effiziente Erzeugung von Wärme, bedarfsgerechte Stromerzeugung oder dezentrale Gasaufbereitung

Rohstoffbasis

- Entwicklung von hochflexiblen Anlagenkonzepten hinsichtlich der Substratflexibilisierung: Konzepte zur verstärkten Nutzung von Rest- und Abfallstoffen sowie alternativer, landwirtschaftlicher Anbaubiomasse unter Berücksichtigung der sinkenden und schwankenden Substratqualität
- Innovative Substratvorbehandlungsmethoden zur Nutzbarmachung sonst nicht oder nur schwer vergärbare Rohstoffbasen wie Stroh (z. B. durch „steam explosion“)
- Dezidierte Konzepte für Reststoffe und Abfälle der globalen Urbanisierung

Kostenreduzierung, Effizienzsteigerung, Emissionsminderung

Weitere Forschungsanstrengungen bestehen im Bereich Emissionsminderung von Biogasanlagen bei gleichzeitig hoher Flexibilität und Gesamteffizienz sowie Kostenreduzierung (Förderprogramme BMEL „Nachwachsende Rohstoffe, BMBF „Bioprofit“, „BioEnergie 2021“, BMWi „Energetische Biomassenutzung“). Hierzu gehört die Forschung und Entwicklung von:

- Prozessoptimierung: Substrat(vor)behandlung, Enzymzugaben, Spurenelementzugaben, Fütterungsmanagement, höhere Raumbelastung
- Leistungs- und Effizienzsteigerung durch innovative Gärkonzepte
- Entwicklung von Sensoren zur Beurteilung von Biogas-Prozessen im Hinblick auf eine flexible Strom-bzw. Gasproduktion (Biologie, Gasspeicher)
- Automatisierung des Biogasprozesses

- Angepassten Methoden zur Energie- und Massenbilanzierung
- Methoden zur Substratcharakterisierung von Rest- und Abfallstoffen
- Methoden zur Emissionsmessung, Demonstration von Minderungsmaßnahmen
- Besondere Emissionsminderungsmaßnahmen für den flexiblen Betrieb
- Strategien und Anlagenkonzepte für Bestandsanlagen (Post EEG Konzepte)
- Kombination von stofflicher und energetischer Nutzung (Reststoffen, Nährstoffrückgewinnung aus Gärresten)
- Koppelproduktion (organische Säuren, CO₂); Gärrestaufbereitungskonzepte
- Systemintegration von PtX-Technologien

2.2 Thermo-chemische Biomassekonversion, Konversionspfad: Biomassevergasung mit thermo-chemischer KWK-Nutzung

2.2.1 Aktueller Entwicklungsbedarf

Die thermo-chemische Konversion ist heute vor allem durch Technologien zur reinen Wärmeerzeugung geprägt. So ist der Großteil der biogenen EE-Wärmeerzeugung auf Holzfeuerungsanlagen unterschiedlicher Größenklassen zurück zu führen, die in etlichen Anwendungsgebieten schon heute ohne Subventionen konkurrenzfähig sind. Daneben gibt es als zweiten großen Bereich eine Reihe von KWK-Anwendungen in verschiedenen Leistungsklassen. Im oberen Leistungsbereich dominieren unterschiedliche Kondensationskraftwerkstypen mit Wasserdampf- oder ORC-Prozessen. Im mittleren bis kleinen Leistungsbereich kommen verschiedene Vergasertypen zum Einsatz, die mit einem BHKW zur KWK-Nutzung der gereinigten Gase gekoppelt werden. Der Bestand von 795 EEG-Verbrennungsanlagen zur Nutzung fester Biomasse produzierte bei einer installierten Gesamtkapazität von 1,6 GW 11 TW Strom und 11,5 TWh KWK-Wärme. Das EEG 2014 und 2017 hat wie im Biogasbereich den Zubau neuer Anlagen stark eingebremst. Auch bei den Holzvergaseranlagen ist 2016 von keinem nennenswerten Zubau auszugehen. Damit sind maximal 430 Holzvergaseranlagen mit insgesamt etwa 43 MW und einer potenziellen Stromeinspeisung von deutlich unter 0,4 TWh vorhanden.

Die thermo-chemische Vergasung mit anschließender KWK-Nutzung (Motor oder zukünftig auch Brennstoffzelle) wird als ein vielversprechendes Verfahren innerhalb der Energiebereitstellung aus biogenen Festbrennstoffen angesehen, die mit hohem Wirkungsgrad vor allem dezentral Strom und Wärme erzeugt (Zeymer et al. 2013). Als Nebenprodukt entsteht bei manchen Technologien auch Biokohle (Pfemeter und Liptay 2014).

Durch die EEG-Förderung in 2000–2013 hat sich dieser Konversionspfad im Bereich Standardisierung, Anwendungssicherheit, technischer Reife und Emissionsschutz weiterentwickelt. Weitere Entwicklungen zur Flexibilisierung der Anlagen und der besseren Verwertbarkeit unkonventioneller Brennstoffe befinden sich in der Demonstration oder werden als Prototyp umgesetzt und zur Serienreife weiterentwickelt.

Als Substrat werden bei kleinen und mittleren Leistungsbereichen vor allem Holzhackschnitzel oder Holzpellets als Brennstoff genutzt. Dabei bestehen hohe Anforderungen an den Brennstoff hinsichtlich der Reinheit, des Wassergehalts und der Stückigkeit. Es können jedoch auch Rest- und Abfallstoffe, wie beispielsweise Grünschnitt oder Gärreste vergast werden. Hier besteht jedoch noch Optimierungsbedarf in Bezug auf die Gasqualität und den Wirkungsgrad (Full 2015).

Bei der Biomassevergasung bestehen relativ hohe Anforderungen an die eingesetzten Rohstoffe, weshalb auch Konditionierungsverfahren zur Modifikation der eingesetzten Biomassen untersucht werden (Thrän et al. 2016b). Weiterhin können kleine Vergasungsanlagen sehr gut und schnell geregelt werden. Aufgrund derzeit noch relativ hoher Investitionskosten ist die Technologie jedoch nicht weit verbreitet.

Gegenüber biobasierten Kondensationskraftwerken im mittleren Leistungsbereich, vor allem bei der Nutzung von ORC-Prozessen, werden im unteren Leistungsbereich der Biomassevergasung mit anschließender motorischer KWK-Nutzung höhere elektrische Wirkungsgrade von rund 25 bis 30 % erreicht (Ponitka et al. 2016). Mit steigender Anlagengröße ist die Flexibilisierbarkeit der Strombereitstellung bisher durch höhere Komplexität, beschränkte Leistungsregelbarkeit, Aufheizbedarf und komplexes Anfahrverhalten noch eingeschränkt.

Nach der Vergasung kann anstatt einer motorischen Nutzung aber auch eine Prozesskette zur Synthese von Energieträgern z. B. Methan (SNG) erfolgen. In diesem Beispiel ist ein Konversionsgrad Biomasse zu Methan von 70 % bis zu maximal 80 % (abzüglich der Verluste aus der Gasreinigung) möglich. Die Produktion von biogenem Wasserstoff über die thermo-chemische Konversion ist über große Vergasungsanlagen technisch ebenfalls realisierbar (Zech et al. 2013), jedoch bisher wirtschaftlich ohne Förderung nicht tragfähig.

Neben den klassischen Verbrennungs- und Vergasungsprozessen gibt es seit einigen Jahren auch Konversionsverfahren „Hydrothormaler Prozesse“ (HTP) die ebenso den thermo-chemischen Konversionspfaden zugerechnet wird. Der Entwicklungsstand dieser Technologieplattform befindet sich heute in Deutschland im Stadium der Demonstration, wobei vor allem die Klärschlammbehandlung im Vordergrund steht.

2.2.2 Künftiger Entwicklungsbedarf

In vielen Szenarien wird von einem weiteren Anstieg der gekoppelten Wärme- und Stromerzeugung ausgegangen (Kunz und Kirrmann 2016; Nitsch 2016). Durch Markteinführungsprogramme und gezielte Forschung sollte der Übergang von der reinen Wärme- zur gekoppelten Strom- und Wärmeerzeugung unterstützt werden. Diese Technologien können ein sehr hohes Exportpotenzial aufweisen (Thrän et al. 2015a).

Die aktuellen Entwicklungstendenzen erschweren den Ausbau von Wärmenetzen (kostenintensive Installation von Fernwärmenetzen, nicht signifikant steigende Bevölkerung, erwarteter Rückgang der Wärmenachfrage). Diese sind jedoch für eine großtechnische KWK notwendig. Daher müssen technologische und ökonomische Lösungsstrategien entwickelt werden, die sowohl mit bestehenden Fernwärmenetzen

auf konventioneller Energiebasis als auch mit Mikro-Netzen und Objektversorgungsansätzen harmonisieren (Barisic et al. 2015).

Der Fokus liegt dabei insbesondere auf einer effektiveren Nutzung der Biomasse durch einen deutlichen Anstieg des KWK-Anteils der Biomasse-Verstromung. Dabei könnten sich die Holzvergasung und die Bioenergiegewinnung aus Rest- und Abfallstoffen erst mittel- bis längerfristig bei höheren Nachhaltigkeitsanforderungen bzw. höheren Preisen für Spitzenlaststrom durchsetzen (Thrän et al. 2015a).

Technologieplattform Hydrothermale Prozesse

Hydrothermale Prozesse umfassen Verfahren zur hydrothermalen Umsetzung (hohe Temperatur in wässriger Umgebung) nasser Rohstoffe bei Reaktionsbedingungen von ca. 50 bis 200 bar und zwischen 150 bis 350 °C. Sie werden für die Prozessierung von Kraftstoffen schon länger entwickelt, wenngleich bislang keine kommerziellen Anlagen in Deutschland in Betrieb sind. Die zukünftige Entwicklung der Technologieplattform zu hydrothermalen Prozessen zielt vor allem darauf ab, dass die Entwässerungsfähigkeit der HTP-Produkte und die Möglichkeiten zu Nährstoffrückgewinnung (Stickstoff, Phosphor, Kali) verbessert werden sowie dabei gleichzeitig die Abtrennung von Schwermetallen und anderen Schadstoffen optimiert wird (Vogel 2016). Grundsätzlich besteht noch Entwicklungsbedarf über den gesamten Prozess u. a. in Bezug auf die Skalierung hin zu größeren Durchsätzen; Anpassung der Prozessparameter für höhere Qualität des erzeugten Biocrude.

2.2.2.1 Flexibilisierung der Energiebereitstellung

Vor dem Hintergrund der Anforderungen des Stromsystems sollten die technischen Lösungen für regelbare und örtlich kombinierbare Systeme mit Flexibilisierung der KWK-Systeme zur Stabilisierung der fluktuierenden Stromerzeugung bei konsequenter Wärmeauskoppelung forciert werden. Dabei stehen vor allem kleinere und größere Vergasungsanlagen im Fokus, da zum einen kleinskalige Aggregate in Quartierskonzepten und große Anlagen in Verbindung mit Nahwärmenetzen hohe Gesamtwirkungsgrade versprechen. Generell sollten zukünftige Konzepte aber vor allem hohe elektrische bzw. Gesamteffizienzen aufweisen, hohe Lastwechselraten ermöglichen und dies bei hohen Leistungsbereichen (Thrän 2015). In dem Rahmen spielt der Aufbau von Wärmenetzen eine wesentliche Rolle, da diese für sich genommen und durch zusätzliche thermische Speicher eine hohe stromseitige Flexibilität ermöglichen (Kunz und Kirrmann 2016).

Hohes Innovationspotenzial liegt bei der Vergasungstechnologie insbesondere im kleinen Leistungsbereich. Hier kann mittels optimierter Motoren oder Brennstoffzellen die elektrische Effizienz gesteigert sowie die spezifischen Kosten gesenkt werden und gleichzeitig die Flexibilität und damit die Passfähigkeit zu anderen Technologien verbessert werden. Bis 2050 sind elektrische Wirkungsgrade von > 40 % denkbar, die sich aus einem Kaltgaswirkungsgrad der Vergasung > 75 % und elektrischer Brennstoffzellenwirkungsgrad > 55 % ergeben (Ponitka et al. 2016). Die Forschung sollte auf Konzepte für geeignete Aufbereitung von Nebenprodukten, Rest- und Abfallstoffen, flexible Vergasungsprozess mit geringem Gasreinigungsaufwand und adaptierten Brennstoffzellen konzentriert werden, sowie die notwendigen Systemin-

tegrationsregler entwickeln (Gesamtkonzept SmartBiomassHeat) (Lenz und Ortwein 2017). Dies gilt auch für Vergaser höherer Leistungsbereiche. Die Option Brennstoffzellen-BHKW mit Synthesegas aus Reststroh als Brennstoff hat aus nachhaltiger Sicht langfristiges Potenzial (Eltrop 2014).

Die Entwicklung und Anwendung von Brennstoffzellen könnten zu einem Technologiesprung führen. Forschungsbedarf liegt hier vor allem auch in der Erhöhung und Stabilisierung der Gasqualitäten. So können schwankende Gasqualitäten erheblich zur Degradation der Brennstoffzellen beitragen. Prozessregelungssysteme müssen implementiert werden, um den sicheren Betrieb biogen betriebener Brennstoffzellen zu gewährleisten.

2.2.2.2 Rohstoffbasis

Besonders im kleintechnischen und mittleren Leistungsbereich bestehen Potenziale im Ausbau der Rohstoffvarianz (Rest- und Abfallstoffe). Bisher verursachen ungünstige Rohstoffparameter (z. B. höhere Asche- oder Wassergehalte, geringere Ascheschmelztemperaturen) Probleme in der Produktgasqualität (Zeymer et al. 2013).

Durch eine geeignete Aufbereitung z. B. Waschen, Homogenisieren, Additivieren, Torrefizieren, hydrothermale Prozesse und/oder Kompaktieren können Festbrennstoffe mit definierten Eigenschaften gewonnen, auf die die Vergasungsanlagen optimal ausgelegt und somit hohe Produktgasqualitäten erreicht werden.

Hier setzen viele Fragestellungen zu thermodynamischer und thermo-chemischer Grundlagenforschung für ein breites Brennstoffband an, die vor allem die Effizienzsteigerung der Anlagen im Blick haben. Als Beispiele seien genannt, Zusammenwirkung der komplex interagierenden Teilsysteme, Schnelltests für die Bestimmung der Eignung und Aufbereitungsbedarfe der Reststoffe, praktikable und preisgünstige physikochemische Bestimmung und Konditionierung der Inputströme (FVEE 2016; Rochlitz et al. 2016).

2.2.2.3 Kostenreduzierung, Effizienzsteigerung, Emissionsminderung

Generell haben Verunreinigungen wie Staub und Aschepartikel sowie besonders höhere Kohlenwasserstoffe wie Teer einen wesentlichen Einfluss auf Qualität des Produktgases in den Arbeitsmaschinen zur Kraft-Wärme-Kopplung und bei Brennstoffzellen. Geeignete Technologieansätze zur Gaskonditionierung sind zurzeit wesentliche Kostentreiber und Hemmnisse für Effizienzsteigerungen und Kostensenkungen, da diese noch einen hohen technischen Aufwand nach sich ziehen. Um kostengünstige Ansätze zur Emissionsminderung im Bereich staub- und gasförmiger Schadstoffemissionen (Gesamtstaub, PM_{10} , CO, C_nH_m und NO_x) zu entwickeln, sind effektive, kostengünstigste, sichere und langzeitstabile Ansätze gefragt mit denen die geforderten Grenzwerte erreicht werden können (Full 2015). Hier spielt vor allem die Entwicklung von geeigneten Katalysatoren eine zentrale Rolle, da die steigenden Emissionsschutzanforderungen nicht allein durch eine optimierte Prozessführung zu erreichen sind. Ferner besteht Forschungsbedarf in der Kopplung mit anderen EE-Technologien in bivalenten- bzw. multivalenten Systemen. Im Wärmebereich sind das vorrangig solarthermischen Anlagen oder Wärmepumpen oder mit mikrobiellen Biomethanerzeugungsanlagen, die direkt mit Holzgas gespeist werden.

Im Kontext angepasster Systemregler sind ebenfalls entsprechende Prognoseverfahren, Algorithmen und Modelle zur flexiblen Integration in erneuerbare Strom,- und Wärmeversorgungskonzepten erforderlich (Thrän et al. 2016a; Fraunhofer IWES (Hrsg.) 2012; Knorr et al. 2014). Daran anschließend sind auch übergreifende Aspekte der Digitalisierung zum Betrieb und Management von realen Versorgungskonzepten wie Datenschutz, Datensicherheit und Abbildung von Geschäfts- und Abrechnungsmodellen mitzudenken.

2.3 Hybride Bioraffinerie, Konversionspfad: SynBioPtX-Konzept

Bioraffinerien werden für unterschiedliche biogene Rohstoffe konzipiert und weiter entwickelt (z. B. Zucker-Bioraffinerie, Stärke-Bioraffinerie, Pflanzenöl-Bioraffinerie, Lignocellulose-Bioraffinerie, Grüne Bioraffinerie, Synthesegas-Bioraffinerie, Bioraffineriekonzepte auf der Basis von Algen). Die Entwicklung von Bioraffinerien wird international als einer der Leuchttürme für eine nachhaltige Bioökonomie gesehen (Hamm und El-Chichakli 2015) und geht weit über die Transformation des Energiesystems hinaus. Im Folgenden beschränken wir uns daher auf den Kraftstoffaspekt: Aktuell wird die Nutzung von Biokraftstoffen (2014: 32,0 TWh) in Deutschland heute von Biodiesel (vorrangig Raps) gefolgt von Ethanol dominiert (Naumann et al. 2014). Zu einem geringeren Anteil wird in Deutschland Biomethan als Kraftstoff genutzt, welches zumeist über das Erdgasnetz verteilt wird. In Zukunft wird damit gerechnet, dass zunehmend Biomethan aus der Biogasaufbereitung, Ethanol der 2. Generation aus Stroh, biogene Dieselsubstitute (HEFA) und gasförmige oder flüssige Synthesekraftstoffe (z. B. Bio-SNG, BTL) produziert und als Kraftstoffe im Verkehrssektor eingesetzt werden. Da das Potenzial für diese Kraftstoffe begrenzt ist, verfolgen die Mitgliedsinstitute des FVEE den Ansatz, zukünftig vor allem über hybride Konversionsverfahren flüssige Energieträger und auch biobasierte Kohlenwasserstoffe für die stoffliche Nutzung bereitzustellen.

Daneben gibt es im Zuge der Sektorenkopplung neben der Stromdirektnutzung den Bedarf für synthetische chemische Energieträger. In einem ersten Schritt wird dazu aus erneuerbarem Strom durch Wasserelektrolyse Wasserstoff hergestellt. Da aber eine Reihe von Anwendungen und bestehender Infrastrukturen nur bedingt für Wasserstoff geeignet sind, ist zusätzlich auch ein Bedarf für Kohlenwasserstoffe gegeben. Dafür braucht es wiederum erneuerbare Kohlenstoffquellen, da in einem weitgehend erneuerbaren Energiesystem fossile Quellen ausscheiden. Es verbleiben damit perspektivisch drei Möglichkeiten zur erneuerbaren Kohlenstoffgewinnung: Prozessbedingte CO₂-Emissionen (z. B. Stahl- oder Zementherstellung), biomassebasierte CO₂-Emissionen bzw. direkte Einkopplung von Wasserstoff in Biomasseprozessketten (z. B. Biogasaufbereitungsanlagen) oder die technische Abscheidung von CO₂ aus der Luft (siehe auch *Technologiebericht 4.4: Verfahren der CO₂-Abtrennung aus Faulgasen und Umgebungsluft*). Aus Sicht der Bioenergie bieten verschiedene Konversionstechnologien ideale Ansatzpunkte für eine Verknüpfung mit Power-to-X Konzepten, da in der Biomasse selbst nennenswerte Mengen Kohlenstoff gebunden sind und bei vielen Verfahren CO₂ als Nebenprodukt anfällt.

In Bezug auf Bioraffinerien wird der Entwicklungsbedarf des SynBioPtX-Konzepts aufgegriffen, welches klassische Biomassekonversionsverfahren und Syntheseprozesse verknüpft und Elektrolysewasserstoff integriert. Die Biomasse oder das in Konver-

sionsprozessen anfallende erneuerbare CO₂ ist dabei die Schnittstelle, steigenden Anforderungen zur Effizienz, Nachhaltigkeit und Treibhausgasminderung gerecht zu werden und fortschrittliche Energieträger und Rohstoffe bereit zu stellen.

2.3.1 Aktueller Entwicklungsstand

In Bezug auf den Stand der Technik sind bereits einzelne Technologien entlang möglicher Prozessketten kommerziell verfügbar, andere im F&E-Stadium (Leonzio 2017; Palmeros Parada et al. 2016). Eine Verknüpfung zu integrierten SynBioPtX-Konzepten für die Herstellung flüssiger Kraftstoffe ist die zentrale Aufgabe in der Zukunft (Müller-Langer et al. 2016; Hornung 2014).

2.3.2 Künftiger Entwicklungsbedarf

In Hinblick auf die zu erreichenden THG-Einsparungen ist zu berücksichtigen, dass genau wie konventionelle Biokraftstoffe, fortschrittliche Biokraftstoffe der gekoppelten Bereitstellung von mehreren Produkten entstammen. Bioraffinerien könnten hierbei durch eine Koppelung von energetischer und stofflicher Nutzung Möglichkeiten eröffnen, die begrenzte Biomasse mit maximalem Gesamtnutzen zu erschließen. Dazu sind im Sinne einer klimaneutralen Kreislaufwirtschaft sog. „Null-Emissions-Technologien“ unter Berücksichtigung des Zusammenspiels erneuerbarer Edukte und Produkte zu entwickeln. Das SynBioPtX-Konzept soll dabei Produkte aus biomasse- und strombasierten Ausgangsstoffen für die stoffliche und energetische Verwertung generieren. Es verspricht dabei vor allem, die Kohlenstoffnutzungseffizienz knapper Biomasseressourcen durch die Einkopplung von Elektrolysewasserstoff zu erhöhen.

Die breite Rohstoffbasis erfordert dabei unterschiedliche Konversionstechnologien, für die im Folgenden exemplarisch Trends und Perspektiven aufgezeigt werden, um die Verknüpfung von Wasserstoffwirtschaft und Bioökonomie zu illustrieren.

2.3.2.1 Flexibilisierung der Energiebereitstellung

Eine grundsätzliche Herausforderung für Konzepte die auf Elektrolysewasserstoff aus PtG (Power-to-Gas) aufbauen, liegt darin, dass der dafür eingesetzte Strom und damit auch der erzeugte Wasserstoff diskontinuierlich anfallen. Die daran anschließenden eher kontinuierlichen Konversionsprozesse erfordern deshalb entweder ebenfalls eine Flexibilisierung oder die Möglichkeit der Wasserstoffspeicherung. Die Speicherung kann aber nicht nur aus prozesstechnischer Sicht notwendig, sondern auch aus ökonomischer geboten sein, um durch eine hohe Auslastung der Anlagen die investitionsgebundenen Produktionskostenanteile möglichst niedrig zu halten. „Smart Processing“ stellt als Bindeglied zwischen unterschiedlich flexiblen Prozessschritten eine weitere Möglichkeit dar, diesen Herausforderungen zu begegnen.

2.3.2.2 Rohstoffbasis

Die Erweiterung der Rohstoffbasis ist ein zentrales Forschungsthema, da vor allem biogene Rest-/Abfallstoffe prozesstechnisch schwieriger zu handhaben sind, als die bisher etablierten Rohstoffe für Biokraftstoffe der ersten Generation. Hierfür sind robuste, inputflexible und trotzdem effiziente Konversionstechnologien notwendig

(siehe auch hydrothermale Prozesse). Auch bei der Nutzung von Algen in Bioraffinerien besteht die Herausforderung darin, die Wirtschaftlichkeit über den gesamten Konversionspfad zu verbessern, einschließlich der vorgelagerten Produktion der Algenbiomasse. Hierfür müssen vorrangig die Kultivierungs- und Verarbeitungskosten gesenkt werden (Laurens und McMillan 2017).

2.3.2.3 Kostenreduzierung, Effizienzsteigerung, Emissionsminderung

Die Weiterentwicklung und Effizienzsteigerung zukünftiger Bioraffineriekonzepte spielt eine wesentliche Rolle für die zukünftige Marktfähigkeit. Die bislang im Labormaßstab entwickelten Technologien müssen zielorientiert in Demonstrationsanlagen im industriellen Maßstab überführt werden. Hierfür ist eine begleitende Technikbewertung mit Fokus auf Stoff- und Energiebilanzierung sowie Kosten und Umwelteffekte notwendig. Weiteres Innovationspotenzial liegt in der Reduktion von THG-Emissionen. Hierfür müssen effizientere und umweltschonendere Konversionstechnologien entwickelt werden. Besonders sind dafür angepasste Sensoren und Messsysteme zur zeitnahen Regelung des Prozesses und Gewährleistung der optimalen Zusammensetzung und der Prozessbedingungen notwendig. Beispiele sind hier spezielle Multisensoren für Temperatur, CO₂/H₂O/H₂-Konzentrationen mit kurzer Ansprechzeit. Weiterer Forschungsbedarf liegt in der Optimierung der Vernetzung zwischen stofflicher und energetischer Nutzung innerhalb der Bioraffineriekonzepte. Ferner sollte ein stärkerer Fokus auf integrierte Konversionskonzepte als Multiproduktanlagen gelegt werden, die prioritär einsatzflexible Produkte wie Methanol, Ethanol oder SNG erzeugen.

3 Relevanz öffentlicher Förderung

3.1 Kriterium 1: Vorlaufzeiten

Anaerobe Fermentation mit motorischer KWK-Nutzung

Biogasanlagen sind generell kommerziell verfügbar. Vorlaufzeiten bis zur Inbetriebnahme der ersten kommerziellen Anlage sind daher nicht gegeben. Die Umsetzung von neuen Biogasprojekten hat zumeist eine Vorlaufzeit von ein bis drei Jahren (FVB 2014). Aktuelle und anstehende Veränderungen, wie zum Beispiel zukünftig von der EEG-Förderung unabhängig zu werden, Flexibilisierung, Effizienzsteigerung, verstärkter Einsatz von Rest- und Abfallstoffen, Digitalisierung erhöhen die Vorlaufzeiten für Projekte, da der Planungsaufwand zunehmend komplexer wird. Dies ist verbunden mit der Notwendigkeit fortlaufend auf Systemänderungen zu reagieren. Die angegebenen Vorlaufzeiten in Tab. 3-1 beziehen sich daher auf die künftigen Anforderungen an Biogasanlagen.

Für den Fall der Technologien zur Flexibilisierung der Anlagen wird von einer Kommerzialisierung bis 2020 für beide Szenarienbereiche ausgegangen. Für die Kommerzialisierung der restlichen Anforderungen an Biogasanlagen wird 2030 für beide Szenarienbereiche prognostiziert.

Tab. 3-1 Vorlaufzeiten bis zur Kommerzialisierung für den Konversionspfad „Anaerobe Fermentation mit motorischer KWK-Nutzung“

Abhängig von den verschiedenen Szenarienentwicklungen und öffentlicher Förderung ist mit der Inbetriebnahme der ersten kommerziellen Anlage in Deutschland zu rechnen ...

Biochemische Biomassekonversion, Konversionspfad „Anaerobe Fermentation mit motorischer KWK-Nutzung“

Szenarienbereich DE_80 % bis 2020 ☒ bis 2030 ☒ bis 2040 ☐ bis 2050 ☐ nach 2050 ☐

Szenarienbereich DE_95 % bis 2020 ☒ bis 2030 ☒ bis 2040 ☐ bis 2050 ☐ nach 2050 ☐

Biomassevergasung mit motorischer KWK-Nutzung

In der Biomassevergasung ist erst der Beginn der Kommerzialisierung zu erkennen (vgl. Tab. 3-2). Der erfolgreichen Kommerzialisierung kleintechnischer Biomassevergasungsanlagen steht vor allem die Förderstruktur, Fehlen einheitlicher Planungsvorschriften und rechtliche Rahmenbedingungen, die sich noch vor allem an konventionellen Großkraftwerken orientieren, entgegen (Zeymer et al. 2013). Es wird erwartet, dass sich die KWK-Nutzung aus der Biomassevergasung (kleinere und mittlere Einheiten) auf Basis von Holz oder aus Rest- und Abfallstoffen erst mittel- bis langfristig und unter hohen Nachhaltigkeitsanforderungen bzw. hohen Erlösen für Spitzenlaststrom durchsetzt und marktreif wird (Thrän et al. 2015a). Längere Vorlaufzeiten sind vor allem bei der Kombination Brennstoffzellen-BHKW mit Synthesegas aus Rest- und Abfallstoffen zu erwarten.

Tab. 3-2 Vorlaufzeiten bis zur Kommerzialisierung für den Konversionspfad „Biomassevergasung mit motorischer KWK-Nutzung“

Abhängig von den verschiedenen Szenarienentwicklungen und öffentlicher Förderung ist mit der Inbetriebnahme der ersten kommerziellen Anlage in Deutschland zu rechnen ...

Thermo-chemische Konversion – Konversionspfad Biomassevergasung KWK

Szenarienbereich DE_80 % bis 2020 ☐ bis 2030 ☐ bis 2040 ☒ bis 2050 ☐ nach 2050 ☐

Szenarienbereich DE_95 % bis 2020 ☐ bis 2030 ☒ bis 2040 ☐ bis 2050 ☐ nach 2050 ☐

SynBioPtX-Konzept als hybride Bioraffinerie

Die Einzeltechnologien entlang des beispielhaften SynBioPtX-Konzepts sind teils kommerziell verfügbar, jedoch bislang nicht als Gesamtkonzept realisiert (Tab. 3-3). Ferner sind in diesem Zusammenhang weiterführende Möglichkeiten zur Bereitstellung von Biokraftstoffen aus Algen, Bakterien oder Rest-/Abfallstoffen kurzfristig nicht im kommerziellen Maßstab zu erwarten (Kreyenberg et al. 2015). Für eine Kommerzialisierung sind daher klare Umsetzungsmaßnahmen notwendig.

Tab. 3-3 Vorlaufzeiten bis zur Kommerzialisierung für den Konversionspfad „SynBioPtX-Konzept“

Abhängig von den verschiedenen Szenarienentwicklungen und öffentlicher Förderung ist mit der Inbetriebnahme der ersten kommerziellen Anlage in Deutschland zu rechnen ...

Szenarienbereich DE_80 % bis 2020 ☐ bis 2030 ☐ bis 2040 ☐ bis 2050 ☒ nach 2050 ☐

Szenarienbereich DE_95 % bis 2020 ☐ bis 2030 ☐ bis 2040 ☒ bis 2050 ☐ nach 2050 ☐

3.2 Kriterium 2: Forschungs- und Entwicklungsrisiken (technisch, wirtschaftlich, rohstoffseitig)

Teilkriterium 2.1 Entwicklungsstadium

Trotz der noch in allen Konversionspfaden zu lösenden Optimierungsfragen stehen in allen genannten Bereichen bereits ausgereifte und marktgängige Technologie zur Verfügung. Um dieses als eine zukunftsfähige Option weiter zu entwickeln und durch neue Ansätze zu ergänzen, stehen in den nächsten Jahren vor allem die nachhaltige flexible Energiebereitstellung sowie die Senkung der Treibhausgasemissionen im Fokus der Forschung. Die Bewertung in Tab. 3-4 bezieht sich auf die drei Technologiegruppen (TG) bzw. Konversionspfade / Konversionspfad:

- TG 1.1.1 Biochemische Biomassekonversion / Anaerobe Fermentation mit motorischer KWK-Nutzung
- TG 1.1.2 Thermo-chemische Konversion / Biomassevergasung + KWK
- TG 1.1.3 SynBioPtX-Konzept als hybride Bioraffinerie

Tab. 3-4 Aktuelles Entwicklungsstadium des gesamten Technologiefeldes Bioenergie sowie der betrachteten Technologiegruppen

Grobklassifizierung	Feinklassifizierung	TG 1.1.1	T1.1.2	T1.1.3
Grundlagenforschung				
	TRL 1 – Grundlegende Prinzipien beobachtet und beschrieben, potentielle Anwendungen denkbar	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Technologieentwicklung		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	TRL 2 – Beschreibung eines Technologiekonzepts und/oder einer Anwendung	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	TRL 3 – Grundsätzlicher Funktionsnachweis einzelner Elemente einer Anwendung/Technologie	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	TRL 4 – Grundsätzlicher Funktionsnachweis Technologie/Anwendung im Labor	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Demonstration		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	TRL 5 – Funktionsnachweis in anwendungsrelevanter Umgebung	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	TRL 6 – Verifikation mittels Demonstrator in anwendungsrelevanter Umgebung	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	TRL 7 – Prototypentest in Betriebsumgebung	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	TRL 8 – Qualifiziertes System mit Nachweis der Funktionstüchtigkeit in Betriebsumgebung	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Kommerzialisierung				
	TRL 9 – Erfolgreicher kommerzieller Systemeinsatz	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

TRL = Technology Readiness Level

TG 1.1.1 = Biochemische Biomassekonversion / Anaerobe Fermentation mit motorischer KWK-Nutzung

TG 1.1.2 = Thermochemische Konversion / Biomassevergasung + KWK

TG 1.1.3 = SynBioPtX-Konzept als hybride Bioraffinerie

Teilkriterium 2.2 Technisches und wirtschaftliches Forschungs- und Entwicklungsrisiko

Die Bewertung wirtschaftlicher Forschungs- und Entwicklungsrisiken wird getrennt für die drei ausgewählten Technologiegruppen bzw. Konversionspfade in den nachfolgenden Tabellen Tab. 3-5, Tab. 3-6 und Tab. 3-7 vorgenommen.

Tab. 3-5 Bewertung technischer und wirtschaftlicher Forschungs- und Entwicklungsrisiken in Zusammenhang mit der Technologiegruppe „Biochemische Biomassekonversion“, Konversionspfad: Anaerobe Fermentation mit motorischer KWK-Nutzung

	sehr gering	gering	eher gering	eher hoch	hoch	sehr hoch
Das <i>technische</i> Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist ...	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Das <i>wirtschaftliche</i> Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist ...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Die technischen Forschungs- und Entwicklungsrisiken für Biogas sind relativ gering, da die prozesstechnologischen Grundlagen bereits auf einen großen Fundus an Erfahrungen aufbauen können. Das wirtschaftliche F&E-Risiko ist hingegen hoch, da Entwicklungsperspektiven sehr stark an die politischen Rahmenbedingungen gekoppelt sind und bestimmte Forschungsfragen der Unsicherheit ausgesetzt sind, dass diese unter veränderten Rahmenbedingungen nicht mehr relevant sind.

Tab. 3-6 Bewertung technischer und wirtschaftlicher Forschungs- und Entwicklungsrisiken in Zusammenhang mit der Technologiegruppe „Thermo-chemische Konversion, Konversionspfad: Biomassevergasung mit thermo-chemischer KWK-Nutzung

	sehr gering	gering	eher gering	eher hoch	hoch	sehr hoch
Das <i>technische</i> Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist ...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Das <i>wirtschaftliche</i> Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist ...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Das technische F&E-Risiko für Technologien zur thermo-chemischen Konversion ist als eher hoch einzustufen, da aktuell vor allem Forschungsfragen von Interesse sind, die auf neuartigen Prozessen beruhen oder bisher wenig erforschte Materialien und konzeptionelle Ansätze zur katalytischen Emissionsminderung verfolgen und daher mit hohen Risiken verbunden sind. Das wirtschaftliche F&E-Risiko ist wie bei der biochemischen Konversion als hoch einzustufen, da die Marktchancen auch hier ganz wesentlich an den regulatorischen Rahmen gekoppelt sind. Es spielt dabei zwar weniger die Ausgestaltung von Anreizsystemen eine Rolle als vielmehr die Ausgestaltung emissionsschutzrechtlicher Regelungen, die sowohl für die Konversionstechnologien als auch für spezifische Emissionsminderungsmaßnahmen maßgeblich sind.

Tab. 3-7 Bewertung technischer und wirtschaftlicher Forschungs- und Entwicklungsrisiken in Zusammenhang mit der Technologiegruppe „Hybride Bioraffinerie“, Konversionspfad: SynBioPtX-Konzept

	sehr gering	gering	eher gering	eher hoch	hoch	sehr hoch
Das <i>technische</i> Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist ...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Das <i>wirtschaftliche</i> Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist ...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Das technische F&E-Risiko für Technologien im Zusammenhang mit dem SynBioPtX-Konzept wird als eher gering eingeschätzt, da die grundlegenden Prozesselemente bereits einen breiten und tiefen Wissensstand aufweisen und vor allem die passende Verknüpfung der einzelnen Komponenten Unsicherheiten unterliegt. Das wirtschaftliche F&E-Risiko wird hoch eingeschätzt, da mittelfristig unklar ist, wie schnell eine Transformation des Raffineriesektors von fossilen Quellen hin zu erneuerbaren Rohstoffen erfolgt, vor allem vor dem Hintergrund, dass durch die zunehmende Substitution von Erdgas und Erdöl in energetischen Anwendungen auf dem Markt durch ein Angebotsüberhang die Preise für fossile Rohstoffe niedrig bleiben (Foster et al. 2017) und so Konkurrenzprodukte keine schnelle und umfassende Marktdurchdringung erfahren könnten.

Teilkriterium 2.3 Rohstoffrisiken

Die Rohstoffrisiken werden für alle drei Technologiegruppen der Bioenergie zusammengefasst dargestellt, da für einzelne Technologien mineralische, metallische oder petrochemische Rohstoffe keine überdurchschnittliche Bedeutung haben. Dennoch spielen für einzelne Komponenten diese Stoffgruppen vor allem bei der biochemischen und thermo-chemischen Konversion oder der Abgasnachbehandlung beim Einsatz von Katalysatoren eine gewisse Rolle. In Bezug auf die gesamte Technologiegruppe nehmen diese jedoch keine herausgehobene Stellung ein. Dominierend sind für alle Technologien und Konversionspfade in erster Linie Rohstoffrisiken auf Seite der Stoffströme. Für die jeweiligen Edukte gelten sowohl für den Bereich Abfall- und Reststoffe als auch für forstliche und landwirtschaftliche Nebenprodukte und Anbaubiomasse jeweils sehr individuelle Risiken für deren langfristige, technische, nachhaltige und ökonomische Verfügbarkeit. Die Frage zur Verfügbarkeit von Einsatzstoffen ist neben der Technologie der entscheidende Schlüsselfaktor für die Umsetzbarkeit von Bioenergiekonzepten.

3.3 Zusammenfassung Förderrelevanz

Zukünftig muss die Bioenergieforschung in einem nachhaltigen Gesamtenergiesystem zunehmend systemische Fragen beantworten. So rücken zum Beispiel Aspekte der Sektorkopplung (Strom, Wärme und Verkehr) und die Steuerung komplexer Systeme mit dezentralen Strukturen stärker in den Fokus (Henning et al. 2015). In den betrachteten Technologiegruppen des Technologiefeldes „Bioenergie“ sind besonders die Bereitstellung von nachhaltigen Bioenergieträgern, von Systemdienstleistungen

und Flexibilitätsoptionen, sowie Emissionsminderung besonders forschungsrelevant (Thrän et al. 2015a).

In der Vorgängerstudie „Energietechnologien 2050“ (Wietschel et al. 2010) wurde bereits der Bedarf der Forschungsförderung für die skizzierten Technologien beschrieben. Für die weitere Entwicklung der Technologien besteht weiterhin zusammengefasst über alle Technologiefelder aufgrund von Marktdefiziten Förderbedarf aus folgenden Gründen:

- Lange Zeithorizonte für die Entwicklung neuer Technologien und Prozessen bis zur Kommerzialisierung, insb. unter wechselnden Rahmenbedingungen und damit mangelnder Ziel- und Planungssicherheit für die Marktteure.
- Ökonomische Risiken für die Forschung und Entwicklung ausgewählter Energietechnologien durch Marktteure nicht allein abdeckbar.
- Strategischer Stellenwert der Bioenergie als Flexibilitätsoption und Systembaustein innerhalb von Bioökonomiewertschöpfungsketten.
- Beständig steigende Anforderungen an die Emissionsminderung tangieren vor allem Technologieansätze zur Emissionsminderung, Analytik und Sensorik.
- Die in vielen Bereichen erzielte Technologieführerschaft soll langfristig gesichert und ausgebaut werden.

Technologieseitig liegen die F&E-Schwerpunkte über alle Technologiefelder in den folgenden Bereichen:

- Optimierung der Reststoff- und Abfallaufbereitung (inkl. Abfall- und Produktrecht)
- Effizienzsteigerungen in der Umsetzung der Ausgangsstoffe in verschiedene Produkte, die nicht nur für die energetische Nutzung relevant sind
- Minderung der prozessbedingten Emissionen entlang der Bereitstellungskette
- Kommerzialisierung und Weiterentwicklung von Optimierungsansätzen
- Flexibilisierung: hochflexible Anlagenkonzepte in Bezug auf Substrate und Output sowie Outputzeiten
- Sektorenkopplung bzw. Koppelung mit anderen EE (Hybridsysteme) sowie Verknüpfung von stofflicher und energetischer Verwertung (z. B. durch SynBioPtX)
- Digitalisierung zur Anlagensteuerung, Vermarktung und Systemintegration

Diese Bausteine sind die Basis für eine künftige smarte Bioenergienutzung zum einen in kleinen, sehr präzise geregelten Anlagen eingebunden in multivalente Versorgungssysteme und zum anderen in hochintegrierten großskaligen Konversionsanlagen mit dem Ziel, zu einer hocheffizienten und nachhaltigen Energie- und Rohstoffversorgung beizutragen. Die Grundvoraussetzung für diese Entwicklung liegt in der Kontinuität der Forschung und in langfristig ausgerichteten politischen Rahmenbedingungen, die vor allem die langfristig sicher abschätzbaren Notwendigkeiten abbilden. Nachfolgend ist die Förderrelevanz für die einzelnen Technologiegruppen zusammengefasst.

Biochemische Biomassekonversion, Konversionspfad: Anaerobe Fermentation mit motorischer KWK-Nutzung

Zusammengefasst verfügt die Biogastechnologie kurz- bis mittelfristig über Innovationspotenzial in Richtung flexible Strombereitstellung und kombinierter Wärmebereitstellung. Über die reine Energieerzeugung hinaus können die etablierten Vergärungsverfahren mittelfristig auch zur Gewinnung von Zwischenprodukten für die stofflich-energetische Nutzung weiterentwickelt werden. Die Forschung dazu ist vor allem noch grundlagenorientiert. Hingegen adressieren die erwähnten energetischen Aspekte vorrangig einen stabilen Anlagenbetrieb bei variierenden Substraten, hohen Raumbelastungen und auch die Optimierung der Biogasaufbereitung.

Thermo-chemische Biomassekonversion, Konversionspfad: Biomassevergasung mit thermo-chemischer KWK-Nutzung

Gemäß verschiedener Studien (Thrän et al. 2015; Nitsch 2016; Nitsch et al. 2012; Fraunhofer IWES et al. 2015) hat die KWK-Nutzung von Synthesegas aus fester Biomasse bei Verschärfung der Nachhaltigkeitsanforderungen und technischer Optimierung langfristig das Potenzial, eine wichtige Rolle innerhalb der energetischen Biomassenutzung zu übernehmen. Die Förderrelevanz in der Technologiegruppe thermo-chemische Biomassekonversion liegt insbesondere in der Entwicklung und Optimierung von Biomasse-KWK-Anlagen im Leistungsspektrum von wenigen kW_{el} bis ca. 5 MW_{el}. Die Forschungsschwerpunkte betreffen vor allem

- thermodynamische und thermo-chemische Grundlagen für die Konversion von Rest- und Abfallstoffen sowie Nebenprodukten mit hoher Betriebsflexibilität im Betrieb (FVEE 2016),
- emissionsarme und flexible Mikro- und Klein-Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen auf Basis fester biogener Abfallstoffe, Rückstände und Nebenprodukten,
- Schnittstellen zur Gebäude- und Regelungstechnik sowie Regelungsalgorithmen,
- Datenverarbeitung zur Vernetzung und optimalen Regelung der Anlagen im Systemverbund unter Berücksichtigung der Datensicherheit (Szarka et al. 2016)

Aufgrund von Anforderungen zur Emissionsminderung (z. B. TA Luft) besteht weiterhin Forschungsbedarf zu Sekundärmaßnahmen für die Emissionsminderung an Kleinfeuerungsanlagen (Hartmann und Lenz 2014; Matthes und Hartmann 2013).

Hybride Bioraffinerie, Konversionspfad: SynBioPtX-Konzept

Im Sinne eines ganzheitlichen und umfassenden Ansatzes zur Energiewende als breit angelegtem Transformationsprozess ist vor allem eine deutlich stärkere Kopplung der einzelnen Sektoren erforderlich. Hier verspricht die Kopplung von Biomasse- und strombasierten Technologien eine Reihe bislang ungenutzter Synergien, die es u. a. erlauben ein höheres Potenzial an erneuerbarem Kohlenstoff (C) zu erschließen und gleichzeitig Emissionen zu mindern. Dafür bedarf es dem SynBioPtX-Konzept folgend einer technologieoffenen Weiterentwicklung der beteiligten Technologiekomponenten entlang entsprechender Konversionsketten. Ein Instrument zur Frühindikation für Wettbewerbsfähigkeit im Kontext Nachhaltigkeit ist eine an die jewei-

ligen TRL/FRL-angepasste Technologiebewertung (Müller-Langer et al. 2016). Die Weiterentwicklung von flüssigen Kraftstoffen über SynBioPtX ist auch deshalb erforderlich, weil durch die künftig anspruchsvolleren Randbedingungen bestimmte Anwendungen wie z. B. Biokerosin als Flugkraftstoff nicht bedient werden können (Thrän et al. 2015a).

4 Detaillierte Bewertung des Technologiefeldes

4.1 Kriterium 3: Marktpotenziale

Die Marktpotenziale wurden auf Basis von Daten aus der Studie Meilensteine 2030 (Thrän et al. 2015) abgeleitet. Dazu ist zu beachten, dass die in Tab. 4-1 dargestellten installierten Kapazitäten und bereitgestellten Energiemengen nicht kumulativ zu interpretieren sind, sondern zwei Allokationsprioritäten darstellen, wobei zum einen eine vorrangige KWK-Nutzung (Strom und Wärme) und zum anderen eine vorrangige Produktion von Kraftstoffen unterstellt wird.

Tab. 4-1 Nationale Ausbaupfade Deutschlands für das Technologiefeld Bioenergie in den Sektoren Strom, Wärme und Verkehr (Maximale Allokation für die einzelnen Sektoren, kein konsistentes Gesamtportfolio)

Sektor		Einheit	2015	2020	2030	2040	2050
Strom	Kapazität	[GW]	6,5	12,9	21,6	32,6	49,6
	Arbeit	[TWh]	49	84	119	147	174
	Volllaststunden	[h]	7.500	6.500	5.500	4.500	3.500
Wärme	Kapazität	[GW]	33	35,2	28,1	27,1	25,8
	Arbeit	[TWh]	132	123	84	68	52
	Volllaststunden	[h]	4.000	3.500	3.000	2.500	2.000
Verkehr	Kapazität	[GW]	14,8	14,3	25,7	32,4	35,5
	Endenergie	[TWh]	119	115	206	260	284
	Volllaststunden	[h]	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000

Quelle: Thrän et al. (2015), nachhaltige Szenarien mit prioritärer KWK- bzw. Kraftstoffherzeugung

4.2 Kriterium 4: Beitrag zu Klimazielen

Der Beitrag zur Minderung der nationalen Treibhausgasemissionen baut auf den in Kriterium 3 dargestellten Marktpotenzialen auf, wobei weitere Abschätzungen und Einflussgrößen in die Berechnung einbezogen wurden. Zum einen wurde aus unterschiedlichen Quellen die Vorkettenemissionen für die Strom- Wärme- und Kraftstoffproduktion aus Biomasse abgeschätzt (Majer et al. 2015; Meisel et al. 2015; Oehmichen et al. 2015; Thrän und Pfeiffer 2013). Zum Anderen wurden aus der Studie „Klimaschutzszenario 2050“ (Hermann et al. 2015) die Kennwerte für die sektoralen Referenzemissionen hergeleitet. Zur Bestimmung der Referenzemissionen wurden jeweils die zeitlich determinierten Mischungsverhältnisse der fossilen Energieträger mit den spezifischen Emissionsfaktoren verknüpft. Es wird also angenommen, dass die Bioenergie in allen drei Sektoren vollständig den im jeweiligen Jahr vorherrschenden Mix an fossilen Energieträgern verdrängt, auch wenn diese Annahme den Beitrag zur THG-Minderung wahrscheinlich überschätzt, da der Biomasse-

seeinsatz im Energiesystem nicht vollständig durch eine Substitution fossiler Energieträger erfolgt. Durch den direkten Zusammenhang zu den Marktpotenzialen ist weiterhin zu berücksichtigen, dass die unter Tab. 4-2 dargestellten absoluten Beiträge zur Emissionsminderung ebenfalls nur innerhalb der einzelnen Sektoren zu betrachten sind und diese nicht kumulativ interpretiert werden dürfen.

Tab. 4-2 Beitrag zu Klimazielen

	Sektor	Bezug	Einheit	2015	2020	2030	2040	2050
Vorketten-Emissionen	Strom	spezifisch	[t CO ₂ /MWh]	0,250	0,232	0,196	0,161	0,125
	Wärme	spezifisch	[t CO ₂ /MWh]	0,025	0,024	0,021	0,018	0,015
	Kraftstoffe	spezifisch	[t CO ₂ /MWh]	0,117	0,104	0,091	0,078	0,065
Referenz-emissionen	Strom	spezifisch	[t CO ₂ /MWh]	0,731	0,803	0,923	0,926	0,991
	Wärme	spezifisch	[t CO ₂ /MWh]	0,256	0,250	0,242	0,239	0,237
	Kraftstoffe	spezifisch	[t CO ₂ /MWh]	0,259	0,260	0,261	0,261	0,261
Max. THG-Minderungsbeitrag je Sektor	Strom	spezifisch	[tCO ₂ /MWh]	0,481	0,571	0,727	0,765	0,866
		absolut	[Mio.t CO ₂]	29	48	86	112	150
	Wärme	spezifisch	[t CO ₂ /MWh]	0,231	0,226	0,221	0,221	0,222
		absolut	[Mio.t CO ₂]	28	28	19	15	11
	Kraftstoffe	spezifisch	[t CO ₂ /MWh]	0,143	0,156	0,170	0,183	0,196
		absolut	[Mio.t CO ₂]	17	18	35	47	56

4.3 Kriterium 5: Beitrag zur Energie- und Ressourceneffizienz

Der Beitrag der Bioenergie im Allgemeinen und der oben dargestellten Technologiegruppen bzw. Einzeltechnologien wird im Rahmen dieser Ausarbeitung nicht dargestellt, wenngleich die energetische Biomassenutzung hierfür wesentliche Beiträge leisten kann (EEA 2013). Eine quantitative und auch qualitative Bewertung über die gesamte Bioenergie hinweg ist auf Grund der komplexen Wechselwirkungen der Bioenergie mit einer Reihe von anderen Stoff- und Wirtschaftskreisläufen nicht trivial.

Gleichwohl können Bioenergieanwendungen beispielsweise einen direkten Beitrag zur Vermeidung des Verbrauchs fossiler Energierohstoffe oder der effizienten Biomassenutzung in Kaskadensystem erzielen. Als Flexibilitätsoptionen können Bioenergieanlagen weiterhin im Stromsektor einen Beitrag zum Ausgleich schwankender Residuallasten leisten und damit die Energieeffizienz im Stromsektor positiv beeinflussen (Holzhammer 2015).

4.4 Kriterium 6: Kosteneffizienz

Die Kosteneffizienz wird im Rahmen der Studie wie der Beitrag zur Energie- und Ressourceneffizienz nicht dargestellt. Zum einen tritt auch hier die Problematik auf, dass sich vielfältige Wechselwirkungen zu anderen Wirtschaftsbereichen ergeben,

vor allem in der Land-, Forst- und Abfallwirtschaft. Zum anderen sind die einzelnen Bioenergiotechnologien hierbei sehr heterogen und daher im Einzelfall zu betrachten. Diese Einzelfallbetrachtung würde an dieser Stelle aber deutlich den Rahmen sprengen, wenngleich es Untersuchungen zu einzelnen Instrumenten wie dem Marktanreizprogramm gibt (Stuible et al. 2016), die eine positive Nettobilanz aufweisen.

4.5 Kriterium 7: Inländische Wertschöpfung

Die Abschätzung der inländischen Wertschöpfung erfolgte auf Basis von Zahlen des BMWi (BMWi 2016b), das für die Sektoren Strom, Wärme und Verkehr die inländische Wertschöpfung aus der Errichtung und dem Betrieb von Anlagen zur Energieerzeugung aus Biomasse darstellt. Der überwiegende Teil der Wertschöpfung der Bioenergie im Jahr 2015 resultiert aus dem Anlagenbetrieb (84 %), trotz des Umstandes dass 2015 die Neubauaktivität in den Sektoren Strom und Wärme gering bis moderat und im Biokraftstoffbereich praktisch null war. Als konservative Schätzung werden deshalb ausschließlich die Wertschöpfungseffekte aus dem Anlagenbetrieb abgebildet. Dazu wurde für das Bezugsjahr 2015 die sektorenspezifische Wertschöpfung je TWh [Mio. €/TWh] bereitgestellter Endenergie berechnet. Dieser Wert wurde anschließend mit den in den Jahren 2020, 2030, 2040 sowie 2050 abgeschätzten Endenergiemengen der Sektoren Strom, Wärme und Verkehr multipliziert. Es wird dabei unterstellt, dass die Wertschöpfungseffekte aus dem Betrieb an die mittlere Preisentwicklung gekoppelt sind und damit inflationsbereinigt keiner Veränderung unterliegen.

Tab. 4-3 Inländische Wertschöpfung basierend auf Technologiefeld Bioenergie hinsichtlich des nationalen Absatzmarktes

Sektor		Einheit	2015	2020	2030	2040	2050
Strom	spez. Wertschöpfung	[Mrd. €/TWh]	0,0758	-	-	-	-
	Arbeit	[TWh]	49	84	119	147	174
	Wertschöpfung	[Mrd. €]	4,5	6,3	9,0	11,1	13,2
Wärme	Kapazität	[Mrd. €/TWh]	0,0240	-	-	-	-
	Arbeit	[TWh]	132	123	84	68	52
	Vbh	[Mrd. €]	2,9	3,0	2,0	1,6	1,2
Verkehr	Kapazität	[Mrd. €/TWh]	0,0211	-	-	-	-
	Endenergie	[TWh]	119	115	206	260	284
	Vbh	[Mrd. €]	2,5	2,4	4,3	5,5	6,0

4.6 Kriterium 8: Stand und Trends von F&E im internationalen Vergleich

Teilkriterium 8.1 Internationale Aufstellung der deutschen Industrie

In den betrachteten Technologiefeldern nimmt Deutschland aufgrund der erfolgreichen Entwicklungen eine weltweite Spitzenposition ein (Tab. 4-4). Um die Positionierung der deutschen Akteure im Bereich der Bioenergie zu festigen und auszubauen, sind weitere Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten bei gleichzeitiger Darstellung von Entwicklungsperspektiven auf dem heimischen Markt erforderlich (FVEE 2016; Barisic et al. 2015). Die Chancen und Potenziale der Bioenergie-technologien werden bisher in der öffentlichen Debatte noch nicht ausreichend aus industrie- und wirtschaftspolitischer Sicht wahrgenommen. Eine verstärkte Vermarktung des Knowhows „Made in Germany“ wäre hier angemessen (Barisic et al. 2015).

Bereits jetzt weisen verschiedene Technologien ein hohes Exportpotenzial auf. Vor dem Hintergrund des künftig geringeren Ausbaus in Deutschland verlagern sich die Aktivitäten der Anlagenhersteller im Biogas- und Holzvergasungsbereich zunehmend ins Ausland (Daniel-Gromke et al. 2014; Rochlitz et al. 2016). Dies ist auch für die Zukunft zu erwarten. Weltweit ist dabei insbesondere für die Zielmärkte in den USA, China und Japan aber auch in vielen europäischen Ländern eine große Dynamik zu verzeichnen. Gleichzeitig ist auf Grund der dort relativ attraktiven Marktbedingungen eine starke Konkurrenz durch Aktivitäten in Forschung und Technologieentwicklung zu erwarten.

Ein erhebliches Marktpotenzial ist auch in vielen sich entwickelnden Ländern gegeben. Die in Deutschland entwickelten Technologien zur Systemintegration der Bioenergie bieten zahlreiche Möglichkeiten besonders in Ländern mit schlecht ausgebauter Energie-Infrastruktur. So können flexibel betriebene Biogasanlagen das Rückgrat ländlicher Energieversorgungsstrukturen bilden und gleichzeitig durch die Verarbeitung von biogenen Abfällen Umwelt- und Hygieneprobleme lösen (IRENA 2014).

Tab. 4-4 Internationale Aufstellung der deutschen Industrie im Technologiefeld Bioenergie (Übergreifend für alle drei Technologiegruppen)

Welchen Status hat die deutsche Industrie hinsichtlich Know-how innerhalb dieses Technologiefeldes weltweit?

Technologiefeld ☒ Technologieführerschaft ☐ wettbewerbsfähig
☐ nur in Einzelanwendungen konkurrenzfähig ☐ abgeschlagen

Teilkriterium 8.2 F&E-Budget

Zur Abschätzung des F&E-Budgets im Technologiefeld Bioenergie wurde als Primärquelle die IEA-Datenbank zu den Forschungs- und Entwicklungsbudgets (Energy Technology RD&D Budgets Database) (IEA 2016a) herangezogen. Die Datenbank enthält beginnend mit dem Jahr 1974 für 29 Länder und die Europäische Kommission Angaben zur Forschungs- und Entwicklungsbudgets für 178 Technologien aus acht Gruppen (IEA 2016b). Da diese nicht direkt auf die hier verwendeten Technologiegruppen übertragbar sind, wird für das gesamte Technologiefeld Bioenergie das

FuE-Budget ausgewiesen. Es wurden dazu F&E-Budgets für folgende Technologien aus der Datenbank zusammengefasst: *143 Agriculture and forestry, 34 Biofuels (incl. liquids, solids and biogases), 341 Production of liquid biofuels, 3411 Gasoline substitutes (incl. ethanol), 3412 Diesel, kerosene and jet fuel substitutes, 3413 Algal biofuels, 3414 Other liquid fuel substitutes, 3419 Unallocated production of liquid biofuel, 342 Production of solid biofuels, 343 Production of biogases, 3431 Thermochemical, 3432 Biochemical (incl. anaerobic digestion, 3433 Other biogases, 3439 Unallocated production of biogases, 344 Applications for heat and electricity, 345 Other biofuels, und 349 Unallocated biofuels.* Es wird nachfolgend zum einen zwischen nationalen, europäischen und weltweiter Aggregation unterschieden. Zum anderen werden die kumulierten Budgets über die gesamte Zeitreihe (1974 bis 2015) und als Trendübersicht der Entwicklung über die letzten 5 Jahren (2010 bis 2015) dargestellt (Tab. 4-5).

Tab. 4-5 F&E Budgets für die energetische Biomassenutzung in Deutschland, der EU und Weltweit für die Jahre 2010 bis 2015 und kumuliert für den Zeitraum 1974 bis 2015 in Mio. €

Jahr(e)	Einheit	2010	2011	2012	2013	2014	2015	1974-2015
BRD	Mio. €	62,29	85,9	70,5	70,0	69,2	69,8	854
EU	Mio. €	904,9	913,1	848,3	881,9	889,6	445,6	11.639
Welt	Mio. €	2.951,1	2.198,1	2.516,8	2.188,9	2.238,7	1.862,0	32.205

Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von IEA (2016a)

Um die Angaben zum eingesetzten FuE-Budget ins Verhältnis zu setzen, erfolgt in Tab. 4-6 ein Vergleich der nationalen und internationalen Budgets für das Jahr 2015 sowie die absoluten und relativen mittleren Entwicklungstrends der Jahre 2010 bis 2015. Die absoluten Trends spiegeln dabei den Mittelwert der jährlichen Veränderungen der 5 Jahre wieder. Der Trend der relativen Veränderungen wurde dem gegenüber als Mittelwert der jährlichen relativen Änderungen angeben, gibt also die mittlere Steigerungsrate in diesem Zeitraum wieder.

Tab. 4-6 Bewertung des Standes von Forschung und Entwicklung für das Technologiefeld Bioenergie

	Einheit	Wert
Entwicklung des öffentlichen F&E-Budgets auf Bundesebene für Bioenergie in Dtl.		
Absolutangabe der öffentlichen F&E-Förderung für Bioenergie (2015)	Mio. €	69,8
Zeitlicher Trend (Veränderung über mindestens die letzten 5 Jahre)	+ Mio. €/a	1,7
Zeitlicher Trend (Veränderung über mindestens die letzten 5 Jahre)	+ %/a	1,5
Gesamtes öffentliches Energie-F&E-Budget nach IEA Status Quo (2015)	Mio. €	863
Relativer Anteil am gesamten öffentlichen Energie-F&E-Budget nach IEA Status Quo (2015)	%	8,1
Zeitlicher Trend (Veränderung über mindestens die letzten 5 Jahre)* ¹	+ %/a	-2,6
Entwicklung des öffentlichen F&E-Budgets für Bioenergie international		
F&E-Förderung der jeweiligen Technologie im OECD-Durchschnitt und/oder im Vgl. mit im Technologiefeld besonders aktivem Land/Ländern (ggf. nachfolgende Zeilen kopieren)		
Absolutangabe der öffentlichen F&E-Förderung für Bioenergie (2015)	Mio. €	1.862
Zeitlicher Trend (Veränderung über mindestens die letzten 5 Jahre)	+ Mio. €/a	-445
Zeitlicher Trend (Veränderung über mindestens die letzten 5 Jahre)	+ %/a	-18,05
Gesamtes öffentliches Energie-F&E-Budget nach IEA Status Quo (2015)	Mio. €	1.106.846
Relativer Anteil am gesamten öffentlichen Energie-F&E-Budget nach IEA	%	0,17
Zeitlicher Trend (Veränderung über mindestens die letzten 5 Jahre)	+ %/a	-13,3
* ¹ Trend bezieht sich auf die relative Veränderung des Anteils der FuE Ausgaben für Bioenergie in Relation zu den gesamten FuE Ausgaben für die Energieforschung		

Teilkriterium 8.3 Publikations- und Patentanalyse

Die *Publikationsanalyse* wurde auf Basis von scopus.com für das Referenzjahr 2014 durchgeführt. Für den linearen Trend der letzten 5 Jahre der deutschen Publikationen wurden die Jahre 2009–2013 berücksichtigt. Der lineare Trend berechnet sich als Anstieg (m) der Funktion $y = m \cdot x + b$ (y =Anzahl der Einzelpublikationen D 2009–2013; x = Jahre 2009-2013). Für den linearen Trend in „%/a bzgl. „Absolutwert“ wird als Absolutwert der „Anteil der in Deutschland geschriebenen Publikationen für den Status quo 2014“ verwendet. Für den linearen Trend in „%/a bzgl. Relativwert“ wird als Relativwert der „(Relative) Anteil der in Deutschland geschriebenen Publikationen am weltweiten Aufkommen beim Status Quo (2014)“ verwendet.

Die Suchwörter beziehen sich auf den „Title“, „Abstract“ und die „Keywords“. Folgende Suchgebiete wurden eingeschlossen: Environmental Science, Energy, Chemical Engineering, Engineering, Agricultural and Biological Science, Chemistry, Biochemistry, Genetics and Molecular Biology, Immunology and Molecular Biology, Social Science, Earth and Planetary Science.

Die *Patentanalyse* wurde auf Basis von DEPATISnet – der Datenbank zu Patentveröffentlichungen aus aller Welt des Deutschen Patent- und Markenamtes (depatisnet.dpma.de) durchgeführt (Maske der Einsteiger Recherche). Als Suchwörter wurden *biogas + KWK* angewendet. Bei der Suche wurde das Veröffentlichungsdatum, nicht das Anmeldedatum angewendet.

Tab. 4-7 Bewertung von Stand und Trends der Forschung und Entwicklung für das Technologiefeld „Biochemische Biomassekonversion“, Konversionspfad: Anaerobe Fermentation mit motorischer KWK-Nutzung – Output-Orientierung

	Einheit	Wert
Akademische Publikationen als Forschungsindikator		
(Relativer) Anteil der in Deutschland geschriebenen Publikationen am weltweiten Aufkommen beim Status Quo (2014)	Absolutwert	3–30
	% bzgl. Welt	6–8
Zeitlicher Trend (über mindestens die letzten 5 Jahre 2009–2013)	%/a bzgl. Absolutwert (2014)	13–45
	%/a bzgl. Relativwert (D/Welt 2014)	15–60
Patente als Entwicklungsindikator		
(Relativer) Anteil der von deutschen Firmen/Privatpersonen und Institutionen eingereichten Patente am weltweiten Aufkommen beim Status Quo (2014)	Absolutwert	8
	%	67
Zeitlicher Trend (über mindestens die letzten 5 Jahre, 2009–2014)	%/a bzgl. Absolutwert (2014)	13,8
	%/a bzgl. Relativwert (D/Welt 2014)	1,7

Für die Technologiegruppe „Biochemische Biomassekonversion, Konversionspfad: Anaerobe Fermentation mit motorischer KWK-Nutzung“ wurden 3 Optionen als Suchwörter für die Publikationsanalyse gewählt: 1. *anerobic digestion AND energy*, 2. *biogas AND anerobic digestion AND energy*, 3. *biogas AND CHP*. Folgende Suchgebiete (Subject area) wurden ausgeschlossen: *Medicine, Mathematics, Decision Science; Materials Science; Multidisciplinary; Health Professional, Computer Science, Economics, Econometrics and Finance, Neuroscience; Physics and Astronomy; Pharma; Undefined; Business, Management and Accounting, Arts and Humanities; Social Science; Veterinary*.

Als Ergebnis wurden entsprechende Spannbreiten für die verschiedenen Optionen der Suchanfrage angegeben. Deutschland liegt im weltweiten Vergleich meist unter den ersten vier Ländern mit den meisten Publikationen auf dem Gebiet. Weiterhin führend sind in der Veröffentlichung von wissenschaftlichen Publikationen die USA, UK, Italien und China. Der Anstieg der Publikationen in Deutschland in den letzten 5 Jahren (2009-2013) liegt bei 13 bis 45 %.

Tab. 4-8 Bewertung von Stand und Trends der Forschung und Entwicklung für das Technologiefeld „Thermo-chemische Konversion“, Konversionspfad: Biomassevergasung mit motorischer KWK-Nutzung

	Einheit	Wert
Akademische Publikationen als Forschungsindikator		
(Relativer) Anteil der in Deutschland geschriebenen Publikationen am weltweiten Aufkommen beim Status Quo (2014)	Absolutwert	1–3
	% bzgl. Welt	9–20
Zeitlicher Trend (über mindestens die letzten 5 Jahre 2009–2013)	%/a bzgl. Absolutwert (2014)	0–23
	%/a bzgl. Relativwert (D/Welt 2014)	0–8
Patente als Entwicklungsindikator		
(Relativer) Anteil der von deutschen Firmen/Privatpersonen und Institutionen eingereichten Patente am weltweiten Aufkommen beim Status Quo (2014)	Absolutwert	3
	% bzgl. Welt	25–30
Zeitlicher Trend (über mindestens die letzten 5 Jahre, 2009–2014)	%/a bzgl. Absolutwert	--
	%/a bzgl. Relativwert	--

Für den Konversionspfad „Biomassevergasung mit motorischer KWK-Nutzung“ wurden als Suchwörter drei Optionen für die Publikationsanalyse gewählt: 1. *Synthesis gas AND CHP AND biomass*; 2. *gasification AND biomass AND CHP*; 3. *gasification AND CHP*. Deutschland liegt im weltweiten Vergleich meist unter den ersten 4 Ländern mit den meisten Publikationen auf dem Gebiet. Der Anstieg der Publikationen in Deutschland in den letzten 5 Jahren (2009–2013) liegt bei 0 bis 0,7 %. Die *Patentanalyse* wurde für dieselben Suchwörter durchgeführt, aber es ergaben sich zu wenige Treffer, als dass ein sinnvoller Trend berechnet werden könnte.

Für das SynBioPtX-Konzept kann eine aussagefähige Scopus basierte Analyse des F&E Outputs nicht vorgenommen werden. Dies liegt vor allem an der heterogenen Terminologie und Diversität der Technologiegruppe. So sind zum Beispiel Begriffe (wie *biofuels* und *physicochemical* etc.) durch die unterschiedlichen technischen Möglichkeiten doppelt belegt (thermochemisch, biologisch und physikochemisch). Nichtsdestotrotz kann aus persönlicher Erfahrung insbesondere im Bereich „flüssige Biokraftstoffe“ ein großer Anteil der Publikationen in Deutschland verortet werden. Ein Schwerpunkt der Publikationstätigkeit auf dem Gebiet liegt aber auch in den USA, China, UK, Brasilien und Indien.

4.7 Kriterium 9: Gesellschaftliche Akzeptanz

Ebene Markt

Eine hohe Akzeptanz bei Investoren und Konsumenten ist besonders gegeben, wenn marktwirtschaftliche Gewinne zu erwarten sind. Die entsprechenden eingesetzten

Instrumente (EEG, Wärmegesetz etc.) sollten daher so gestaltet werden, dass sie eine vorhersagbare Ausbauplanung verschiedener Techniken (Kosten und Kapazität) ermöglichen und Verunsicherung der Investoren und Marktteilnehmer vermeiden (Barisic et al. 2015).

Gesellschaftlich besonders kontrovers diskutiert werden die mit der Stromerzeugung aus Bioenergie zum Teil verbundenen Differenzkosten gegenüber den Strommarktpreisen. Hier gilt aber zu beachten, dass insbesondere bei aktuell niedrigen Energiepreisen „eine stärkere Nutzung erneuerbarer Energien die Energiepreise insgesamt auch stabilisieren kann, da sie als lokale Energiebereitstellungsoptionen nicht unmittelbar den Marktfluktuationen unterworfen sind“ (Barisic et al. 2015).

Biochemische Biomassekonversion, Konversionspfad: Anaerobe Fermentation mit motorischer KWK-Nutzung

Aufgrund der Einschnitte durch das EEG 2014 (EEG 2014) und 2017 (EEG 2017) sind für die Anlagenbetreiber auch mittelfristig keine Investitionen bzw. Weiterentwicklungen zu erwarten, obwohl das EEG 2017 das Ziel der Kosteneffizienz, der Akteursvielfalt und der Einhaltung des Ausbaukorridors verfolgt. Nichtsdestotrotz sehen viele Betreiber und Verbände den zugesicherten Investitions- und Vertrauensschutz für bestehende Biogasanlagen als ungesichert an (Menken 2016).

Thermo-chemische Biomassekonversion, Konversionspfad: Biomassevergasung mit motorischer KWK-Nutzung

Die relativ schnelllebigen Novellierungen des EEG führten zu Unsicherheiten bei den Akteuren und Investitionstaus. Dennoch stiegen die Verkaufszahlen der Anlagenhersteller aufgrund des verstärkten Exports ins Ausland, wo die derzeitigen politischen Rahmenbedingungen günstiger sind und einen wirtschaftlichen Betrieb ermöglichen (Rochlitz et al. 2016).

SynBioPtX-Konzept als hybride Bioraffinerie

Die marktseitige Akzeptanz für die bisher etablierten Biokraftstoffe der ersten Generation ist durch wechselnde Rahmenbedingungen in den letzten Jahren nicht sehr hoch. Vor allem die im Zuge der Debatten um flüssige Importbiomassen ausgelöste Debatte um Palmöl und die allgemeine Kritik gegenüber agrarischer Anbaubiomasse zur energetischen Nutzung unter dem Schlagwort „Tank oder Teller“ hat viele Akteure verunsichert. Die in den zurückliegenden Jahren auf diese gesellschaftliche Debatte zurückzuführenden geänderten Rahmenbedingungen für biogene Reinkraftstoffe sowie die eingeführten Nachhaltigkeitsverordnungen haben ebenfalls dazu beigetragen, Betreiber und Errichter von Anlagen die Sicherheit für langfristig zuverlässige Rahmenbedingungen zu nehmen.

Ebene Gesellschaft/lokale Ebene

Die Akzeptanz der Bioenergie in der Gesellschaft und vor Ort hängt insbesondere von den lokalen Gegebenheiten ab. Zu den wichtigsten Faktoren gehören die Konstellation und das Engagement der (Schlüssel)Akteure und Multiplikatoren, das Gemeinschaftsgefüge, die vorhandenen Infrastrukturen, die Raumstrukturen sowie die

überregionale Vernetzung der Kommunen (Baur et al. 2015). Entsprechend der verschiedenen Wertschöpfungsketten der Bioenergie sind im Vergleich zu den anderen erneuerbaren Energien sehr viele unterschiedliche Akteursgruppen von der Rohstoffgewinnung bis hin zur Nutzung tangiert. Die meisten Akteure haben dabei ein wirtschaftliches Interesse. Bei ca. 22 % der Akteure spielt das Gemeinwohl (Daseinsvorsorge) und Naturschutz bei der Umsetzung von Bioenergieprojekten eine Rolle (Baur et al. 2015).

Hemmnisse für die Umsetzung von Bioenergieprojekten in den Regionen und Kommunen liegen vor allem in fehlenden Finanzierungsmechanismen, insbesondere für Personal (Beratung, Durchführung, Aufbau von Netzwerken, Konsistenz), in z. T. fehlenden Handlungsbefugnissen und unterschiedlichen Interessenslagen. Weitere Hemmnisse sind organisatorischer (Bürokratie, zu geringe Zeitpläne), technologie-spezifischer (Substratabhängigkeit, Geruchsbelästigung, Dimensionierung) und (zwischen-)menschlicher (Kommunikation, Transparenz) Natur (Baur et al. 2015).

Kritische Aspekte bei der Akzeptanz beziehen sich zumeist auf die Biomassebereitstellung und die -produktion. Hier spielt die Frage der Nachhaltigkeit eine wesentliche Rolle. In der Technologiegruppe „Biochemische Biomassekonversion“ bezieht sich dies konkret auf den Anbau von Energiepflanzen (Stichwörter z. B.: Vermaisung der Landschaft, Gülle-Tourismus, Tank-oder-Teller), z. T. erhöhtes Verkehrsaufkommen durch Transporte und die Geruchsbelästigung in siedlungsnahen Bereichen (Baur et al. 2015). Ferner gibt es Kritik an der Treibhausgasbilanz der Biokraftstoffe und den weltweiten Folgen des Anstiegs der Biomasse-nachfrage, der Inanspruchnahme von Wald und der Zerstörung kleinbäuerlicher Strukturen in Entwicklungsländern. Zu berücksichtigen ist jedoch, dass teilweise gesetzliche Regelungen bezüglich Nachhaltigkeitsanforderungen (Pflanzenöle zur Biokraftstoffproduktion im Vergleich zur Nutzung als Nahrungs- und Futtermittel, Forderungen an die Maisproduktion als Biogassubstrat im Vergleich zum Maisanbau als Futtermittel) in der öffentlichen Diskussion oft zu kurz kommen (Barisic et al. 2015).

Ein weiterer Aspekt im gesellschaftlichen Diskurs sind die mit dem Ausbau der Bioenergie verbundenen potenzielle Nutzungskonkurrenzen (z. B. Nahrungs- und Futtermittel kontra energetische und stoffliche Biomassenutzung; stoffliche Holznutzung versus energetische Nutzung; Nutzung von Landfläche für Biomasse versus Photovoltaikkraftwerken) (Barisic et al. 2015). Die Förderung und Subvention des Ausbaus erneuerbarer Energien zur Entwicklung und Markteinführung wird von einigen Akteuren zunehmend kritisch wahrgenommen. Hier müssen den Verbrauchern nachvollziehbar die Ziele für „eine hohe Versorgungssicherheit und einen maximalen Klimaschutz zu volkswirtschaftlich minimalen Gesamtkosten“ (Barisic et al. 2015), künftige Vorteile und sachliche Notwendigkeiten dieser Investitionen vermittelt werden. Integrierte Konzepte fehlen hierfür jedoch (Barisic et al. 2015).

Die Vorteile insbesondere der Biogasbereitstellung liegen in der potentiellen Nutzbarmachung von Reststoffen und Abfällen sowie der flexiblen Energiebereitstellung. Weiterhin kann eine verstärkte Etablierung von alternativen Anbausystemen und Pflanzen in der Nahrungs- und Futtermittelproduktion künftig Biomasseströme generieren, die nicht unmittelbar zur Nahrungs- und Futtermittelproduktion genutzt werden können und damit für eine energetische Nutzung verfügbar wären.

Förderlich für die Akzeptanz könnte auch die Entwicklung von neuen Geschäftsmodellen und Arbeitsprozessen sein, die das bisher sehr feste Verhältnis zwischen Energieversorgern und Abnehmern auflösen könnte (Kloth 2016). Für die Akzeptanz der betrachteten Technologiegruppen sind eine transparente Kommunikation (Öffentlichkeitsarbeit, Marketing, Networking, Beteiligungsoptionen), die Integration in ein konsistentes Gesamtkonzept, Wissen über die Technologie (faktenbasiert) sowie verlässliche Rahmenbedingungen für die Förderung der Bioenergieprojekte wesentlich für die Planungssicherheit. Die Anwendung von sozialpsychologischen Methoden zur Analyse von Kommunikationsmitteln, der Rezeption und den gesellschaftlichen Folgen sollte daher noch intensiviert und stärker auf die Multiplikatoren ausgerichtet werden (Welteke-Fabrizius 2016). Ein weiterer Aspekt ist hier die Förderung von Forschungsansätzen, die technische, wirtschaftliche und soziale Rahmenbedingungen besser zusammen ausgestalten (z. B. effiziente Wärmenutzung, regionale Wertschöpfung).

Im Folgenden erfolgt die Bewertung der Akzeptanz für die einzelnen betrachteten Technologiegruppen, die Akzeptanz des Biogasbereichs ist dabei bisher am besten untersucht (Ehrenstein et al. 2012).

Tab. 4-9 Bewertungsraaster für die Akzeptanz der Technologiegruppe „Biochemische Biomassekonversion“, Konversionspfad: Anaerobe Fermentation mit motorischer KWK-Nutzung zum Status Quo (2015)

Technologien	Ebene Markt		Ebene Gesellschaft		Lokale Ebene	
	Marktakzeptanz		Sozialpol. Akzeptanz		Lokale Akzeptanz	
	Kunden, Haushalte, Nutzer, Industrie: Wie viel investieren Marktakteure?		Sozio-politische Entwicklungen, gesellschaftliche Stimmung / Diskurse; Image		Lokale Konflikte, Klagen, Aktivitäten von Bürgerenergie	
	Bewertung	Begründung/ Quelle (Studien)	Bewertung	Begründung/ Quelle (Studien)	Bewertung	Begründung/ Quelle (Studien)
Biogasanlage NawaRo	Eher niedrig (4)	(Barisic et al. 2015)	Mittlere Akzeptanz (3)	(Kabasci et al. 2012), (Barisic et al. 2015)	Mittlere Akzeptanz (3)	(Kabasci et al. 2012) (Barisic et al. 2015; Baur et al. 2015); (Ehrenstein et al. 2012)
Biogasanlage Bioabfall	Eher hoch (2)		Mittlere Akzeptanz (3)	(Ehrenstein et al. 2012)	Mittlere Akzeptanz (3)	

Bewertung mittels 5-stufiger Skala: Hohe Akzeptanz (1), eher hohe Akzeptanz (2), mittlere Akzeptanz (3), eher niedrige Akzeptanz (4), niedrige Akzeptanz (5)

Für Schwerpunkte der Technologiegruppen thermo-/physikalisch-chemische Konversion/Bioraffinerien gibt es bis dato keine tiefgründigen Studien zur Akzeptanz. Hier besteht noch Forschungsbedarf.

Mit der Biomassevergasung wurden in der Vergangenheit schlechte Erfahrungen gemacht. Dies betrifft insbesondere die Sicherheitsstandards, Gasreinigung, die Synthese und auch den Gesamtprozess/-systemkonzeption. In den letzten Jahren wurden hier aber vielversprechende Lösungen entwickelt, die es zu optimieren gilt. Best

Practice Erfahrungen für Vergasungs-, Gasreinigungs- und Syntheseoptionen müssen dem Akteuren besser vermittelt werden, um die Akzeptanz zu heben (DECHEMA e.V. 2016).

Tab. 4-10 Bewertungsraaster für die Akzeptanz der Technologiegruppe „Thermo-chemische Biomassekonversion“, Konversionspfad: Biomassevergasung mit thermo-chemischer KWK-Nutzung zum Status Quo (2015)

Technologien	Ebene Markt		Ebene Gesellschaft		Lokale Ebene	
	Marktakzeptanz		Sozialpol. Akzeptanz		Lokale Akzeptanz	
	Kunden, Haushalte, Nutzer, Industrie: Wie viel investieren Marktakteure?		Sozio-politische Entwicklungen, gesellschaftliche Stimmung / Diskurse; Image		Lokale Konflikte, Klagen, Aktivitäten von Bürgerenergie	
	Bewertung	Begründung/ Quelle (Studien)	Bewertung	Begründung/ Quelle (Studien)	Bewertung	Begründung/ Quelle (Studien)
	Mittlere/teils-teils Entscheidung (3)	Expertenerfahrung	Mittlere/teils-teils Entscheidung (3)	Expertenerfahrung	Mittlere/teils-teils Entscheidung (3)	Expertenerfahrung

Bewertung mittels 5-stufiger Skala: Hohe Akzeptanz (1), eher hohe Akzeptanz (2), mittlere Akzeptanz (3), eher niedrige Akzeptanz (4), niedrige Akzeptanz (5)

Trotz vorhandener Nachhaltigkeitsverordnung sind die Bedenken in der Öffentlichkeit bezüglich des Einsatzes von flüssigen Bioenergieträgern besonders hoch (FVEE 2016). Hier müssen noch besser die Vor- und Nachteile differenziert vermittelt werden. Fortschrittliche alternative flüssige Brenn- und Kraftstoffe ohne bisher negativen „Touch“ bieten die Chance die Akzeptanz in der Gesellschaft gleich von Beginn erhöhen. Hierfür ist eine geeignete Kommunikationsstrategie frühzeitig vor Markteinführung notwendig.

Da es noch keine kommerziellen Anlagen gibt, ist die Akzeptanz für das SynBioPtX-Konzept schwer abzuschätzen. Die Akzeptanz ist vor allem bei den Endnutzern (privat/gewerblich) ein entscheidender Aspekt (Stichwort: Klimafreundlicher Verkehr). Die Einbindung von Akteuren hinsichtlich der Praxisrelevanz und Umsetzbarkeit ist dafür notwendig. Hierfür müssen geeignete Methoden aus der Akzeptanz-, Kommunikation und sozio-ökonomischen Forschung entwickelt werden und die Forschung auf diesem Gebiet intensiviert werden.

Positiv auf die Akzeptanz wirken sich die erwarteten hohen THG-Minderungen aus, die aus der Kopplung mit EE-Strom erwartet werden (Lambrecht und Müller-Langer 2015). Die THG-Minderungspotenziale liegen je nach Szenario (Substrat, Aufbereitung, H₂-Produktion) im Durchschnitt bei 60 %. Ferner bietet die Biomasse -und strombasierte Technologie eine Reihe von bislang ungenutzten Synergien. Damit hat sie ein höheres Potenzial erneuerbarem Kohlenstoff (C) zu erschließen. Vor allem für den Luftverkehr gelten vor allem „Hydroprocessed renewable jet fuels“ aus Klimaschutz- und Kostengründen nach heutigem Entwicklungsstand als eine vielversprechende Option (Wang und Tao 2016).

Für alle Bioenergiepfade gilt es, geeignete Ansatzpunkte im ländlichen Raum, vor allem die Partizipationsmöglichkeiten für Einwohner im Einzugsgebiet der Anlagen zu schaffen. Ferner sollte das Spektrum der Anbaubiomassen hin zu extensiven und ökologischen Kulturarten, die neben der Energiebereitstellungen weitere Synergieeffekte für zum Beispiel die Biodiversität schaffen, generiert werden (Wüstemann et al. 2017).

4.8 Kriterium 10: Unternehmerisch-technische Pfadabhängigkeit und Reaktionsfähigkeit

Zur Bewertung der unternehmerisch-technischen Pfadabhängigkeiten und Reaktionsfähigkeiten werden im Folgenden für drei Beispieltechnologien aus den Technologiegruppen „Biochemische Biomassekonversion“, „Thermo-chemische Konversion“, sowie „Hybride Bioraffinerie“ Angaben zu Planungs-, und Bauzeiten, den heute üblichen Nutzungsdauern der Gesamtanlagen, die spezifischen Investitionskosten für eine definierte Referenzanlage sowie der Anteil der fixen Kosten an den spezifischen Investitionskosten dargestellt. Für die Technologiegruppe „Biochemische Biomassekonversion“ wird beispielgebend der Konversionspfad Anaerobe Fermentation mit motorischer KWK-Nutzung dargestellt.

Tab. 4-11 Indikatoren zur Bewertung der Pfadabhängigkeit und Reaktionszeit für die Technologiegruppe „Biochemische Biomassekonversion, Konversionspfad: „Biogasanlage“

Variable	Einheit	Heute	2020	2030	2040	2050
Planungszeit	Monate	24	24	24	24	24
Bauzeit	Monate	12	12	12	12	12
Heute übliche ökonomische Nutzungsdauer	Jahre	20	25	25	30	30
Spezifische Investition ^{*1}	€ ₂₀₁₅ /kW _{el}	3.600	3.500	3.300	3.100	2.900
Fixe Kosten an spezifischer Investition	%	15	15	15	15	15

^{*1} Die spezifischen Investitionskosten beziehen sich auf eine flexible Anlage mit 475 kW Bemessungsleistung und konstanter Gasproduktion. Über die Jahre wird angenommen, dass Anlagen immer flexibler werden, d. h. im Verhältnis zur Bemessungsleistung immer mehr installierte Leistung vorhalten, siehe dazu Tab. 1-2. Im Falle einer Flexibilisierung der Gasproduktion sind zu den dargestellten Kosten weitere Aufwendungen anzusetzen.

Tab. 4-12 Indikatoren zur Bewertung der Pfadabhängigkeit und Reaktionszeit für die Technologiegruppe „Thermo-chemische Konversion, Konversionspfad: Biomassevergasung mit thermo-chemischer KWK-Nutzung“

Variable	Einheit	Heute	2020	2030	2040	2050
Planungszeit	Monate	3-12	3-12	3-12	3-12	3-12
Bauzeit	Monate	3	2-3	2-3	1-2	1-2
Heute übliche ökonomische Nutzungsdauer	Jahre	20	20	20	25	25
Spezifische Investition [€/kW _{el}]	€ ₂₀₁₅ /Einheit	2.000	2.000-3.500	2.000-3.500	2.000-3.500	2.000-3.500
Fixe Kosten an spezifischer Investition	%	2,5 - 5	2,5 - 5	2,5 - 5	2,5 - 5	2,5 - 5

Tab. 4-13 Indikatoren zur Bewertung der Pfadabhängigkeit und Reaktionszeit für die Technologiegruppe „Hybride Bioraffinerie, Konversionspfad: SynBioPtx-Konzept

Variable	Einheit	Heute	2020	2030	2040	2050
Planungszeit	Monate	36-60				
Bauzeit	Monate	24-36				
Heute übliche ökonomische Nutzungsdauer	Jahre	20-30				
Spezifische Investition	€ ₂₀₁₅ /kW _{FWL}	300-500				
Fixe Kosten an spezifischer Investition	%	13-16				

4.9 Kriterium 11: Abhängigkeit von Infrastrukturen

Die energetische Biomassenutzung ist in vielen Fällen von Infrastrukturen abhängig. Bei sehr kleinskaligen Anwendungen können Infrastrukturen geringeren Einfluss haben, so beispielsweise bei der Wärmebereitstellung in Einzelraumfeuerstätten, die mit eigenem Holz betrieben werden. Es werden zuerst übergreifende Bezüge zur Infrastrukturabhängigkeit beschrieben und nachfolgend einige Spezifika für die drei Technologiegruppen dargestellt. Zu den Übergreifenden Bezügen stehen im Folgenden die Stromnetzinfrastuktur, Verkehrsinfrastrukturen, hier vor allem das Straßenverkehrssystem sowie Informations- und Kommunikationsinfrastrukturen im Fokus, da diese drei Infrastrukturen für nahezu alle Technologien in diesem Technologiefeld relevant sind.

Die Stromnetzinfrastuktur spielt eine zentrale Rolle zur Bereitstellung von Hilfsenergie zur Netzeinspeisung für Technologien, die der Stromerzeugung dienen und nicht ausschließlich als Inselanlage betrieben werden. Eine flexible Betriebsweise von Anlagen kann darüber hinaus Netzverstärkungsmaßnahmen durch Erhöhung der Anschlussleistung nach sich ziehen, aber ebenso den Netzausbaubedarf in der Verteilnetzebene potentiell reduzieren (Trommler et al. 2016). Da die Biomassekonversion zwingend mit dem Umsetzen von Masse verbunden ist, kommen bei den verschiedenen Technologien die unterschiedlichsten Förder- oder Mischaggregate zum

Einsatz. Diese werden in der Regel mit Elektromotoren angetrieben, so dass auch bei Anlagen, die keinen Strom bereitstellen, ein Netzanschluss obligatorisch ist. Im Falle der Stromeinspeisung muss über den Netzverknüpfungspunkt auch die erzeugte Arbeit eingespeist werden. Zukünftig wird neben dem Bereitstellen von Arbeit aber auch die Bereitstellung von Leistung eine zunehmend wichtige Rolle spielen, so dass eine systemdienliche Netzintegration von Anlagen zunehmend wichtig wird. Dieser Punkt wird noch einmal im Detail in Kapitel 4.10 im Kriterium Systemkompatibilität aufgegriffen.

Verkehrsinfrastrukturen sind vor allem für die Logistik von Biomasse und Nebenprodukten relevant. Hier spielt vor allem das Straßenverkehrssystem die entscheidende Rolle, weil die allermeisten Anlagen zur energetischen Biomassenutzung nicht über einen Schienen- oder Schifffahrtsweganschluss verfügen, wenn man von großen zentralen Anlagen im Bereich Holzpellets oder Biokraftstoffe absieht. Neben den öffentlichen Straßen- und Schienenwegen spielen aber auch frost- und agrarwirtschaftliche Wege eine wesentliche Rolle, um verfügbare Biomassepotenziale erschließen zu können. Die Bedeutung des Ferntransports von biogenen Energieträger nimmt mit deren Energiedichte zu, so dass für die meisten Rohstoffe regional eher kurze bis mittlere Transportentfernungen zu überbrücken sind und energieangereicherte Endprodukte durchaus auch international gehandelt werden. Im Kontext der Mobilitätsinfrastrukturen ist ebenfalls zu berücksichtigen, dass Biokraftstoffe und Biomethan auf Grund gleichartiger Eigenschaft nahtlos in die bestehenden Energieverteilungs- und Nutzungsinfrastrukturen integriert werden können.

Auch für die Bereitstellung von Bioenergie wächst die Bedeutung von Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT), da zum einen die Automatisierungsgrade für die Steuerung und Regelung von Anlagen wachsen und vor allem im Stromsektor die Vernetzung der Anlagen und deren Aggregation in virtuellen Kraftwerken (VK) zunimmt.

Tab. 4-14 Abhängigkeit des Technologiefeldes Bioenergie von Infrastrukturen

	Ja	Nein
Die Nutzung der Technologie(n) ist <i>unabhängig</i> von Infrastrukturen möglich. ¹	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Die Nutzung und Verbreitung der Technologie(n) ist von <i>bestehenden</i> Infrastrukturen abhängig. ¹	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Zur Verbreitung und Nutzung der Technologie(n) müssen <i>bestehende</i> Infrastrukturen ausgebaut werden. ¹	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Zur Verbreitung und Nutzung der Technologie(n) müssen <i>neue</i> Infrastrukturen gebaut werden. ¹	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

¹ Die Abhängigkeit von Infrastrukturen ist stark abhängig von der Auslegung bestimmter Konversionspfade (netzgekoppelte- oder Inselsysteme) und der Logistik der Rohstoffe.

Weitere spezifische Infrastrukturanforderungen

Neben den oben genannten Zusammenhängen spielt auch die Gasnetzinfrastruktur eine bedeutende Rolle, wenn als Produkt der Biomassekonversion Methan erzeugt wird, das ins Erdgasnetz eingespeist werden soll. Da moderne Bioenergieanlagen zu-

nehmend elektronisch gesteuert sind und in vielen Fällen eine Reihe von elektrisch betriebenen Hilfsaggregaten zum Einsatz kommen, ist ein Anschluss an das Stromnetz in der Regel obligatorisch, wenngleich es auch stromnetzunabhängige Anlagen gibt. Die zukünftig fortschreitende Automatisierung und Digitalisierung, vor allem bei der vernetzten Regelung von Anlagen, setzt zum Teil auch eine Netzwerkverbindung voraus. Diese Verbindung kann aber je nach Anwendungsfall nur auf lokale Komponenten beschränkt sein oder z. B. bei Einbindung in ein virtuelles Kraftwerk auch eine Schnittstelle zum Internet beinhalten.

4.10 Kriterium 12: Systemkompatibilität

Die grundsätzliche Systemkompatibilität ist groß, allerdings ist der Rohstoff begrenzt, daher müssen von Systemseite klare und dauerhafte Prioritäten gesetzt werden, um eine möglichst gute Technologieentwicklung zu erreichen. Technologien zur energetischen Biomassenutzung sind daher in hohem Maß dazu geeignet komplementäre Funktionen in verschiedenen Sektoren zu übernehmen. Allgemein zeichnet sich Biomasse, analog zu anderen chemischen Energieträgern, durch eine hohe Energiedichte, eine vergleichsweise gute Lagerbarkeit und vor allem die Möglichkeit zum bedarfsgerechten Einsatz aus. Die spezifischen Effekte unterscheiden sich in den Sektoren Strom, Wärme und Mobilität und werden trotz der hervorragenden Möglichkeiten der Bioenergie im Rahmen der Sektorkopplung im Folgenden getrennt bewertet werden.

Teilkriterium 12.1 Rückwirkungen

Stromsektor

Bioenergieanlagen haben trotz der heute vergleichsweise geringen installierten Kapazitäten im Vergleich zu Wind- oder PV-Anlagen einen signifikanten Einfluss auf das deutsche Stromsystem, da die Anlagen mit relativ hoher Auslastung einen nennenswerten Beitrag zur erneuerbaren Stromproduktion leisten. Daher muss bei einem Vergleich neben der installierten Leistung auch stets die jährlich bereitgestellte Energiemenge mitbetrachtet werden. Weiterhin wird heute schon ein Teil des Anlagenbestandes flexibel betrieben und kann damit Schwankungen der Residuallast ausgleichen und Regelenergie zur Netzstabilisierung erbringen.

Wärmesektor

Im Wärmesektor kommt es im Falle der Flexibilisierung von Kraft-Wärme-Koppelungs-Anlagen zu Rückwirkungen auf das jeweilige Versorgungssystem. Es besteht bei der Flexibilisierung von Bioenergieanlagen, die Strom und Wärme erzeugen und diese bedarfsgerecht einsetzen, das grundsätzliche Problem, dass in der Regel Strom- und Wärmelastprofil nicht deckungsgleich sind und sich damit ein Zielkonflikt ergibt welcher Bedarf prioritär bedient werden soll. Um unabhängig vom priorisierten Bedarf den Gesamtnutzungsgrad hoch zu halten, bestehen zwei Optionen die Deckungslücken des nicht priorisierten Bedarfs auszugleichen. Die eine besteht darin einen Wärme- und/oder Strom-Speicher zu verwenden, der Produktion und Verbrauch zeitlich entkoppeln kann, oder alternativ eine multivalente Versorgung durch weitere Erzeuger zu ermöglichen, die Bedarfsüberhänge bedienen. Zukünftig wird

die Bioenergie auch im Wärmebereich zur flexiblen Deckung von Wärmeversorgungslücken in Multi-Wärmeversorgungssystemen herangezogen werden, so dass die Frage der Wärmespeicherung weiter an Bedeutung gewinnen wird.

Mobilitätssektor

Im Mobilitätssektor kommt es in Abhängigkeit des betrachteten Energieträgers zu Rückkoppelungen in Bezug auf die betreffenden Infrastrukturen und Endanwendungen. Biogene Kraftstoffe können zum einen nahtlos in bestehende Infrastrukturen integriert werden, wenn diese vergleichbare Eigenschaftsprofile aufweisen. Auf der anderen Seite können aber auch Inkompatibilitäten mit konventionellen Energieinfrastrukturen auftreten, die zu einer Verschlechterung der Marktabtastung führen kann. Analog dazu können biogene Kraftstoffe auch in Bezug auf die Endanwendung, also beispielsweise einer motorischen Nutzung, unterschiedlichen technischen Begrenzungen unterliegen, da für verbrennungsmotorbasierte Fahrzeugkonzepte zunehmend engere Toleranzbereiche für Kraftstoffe definiert werden, um Effizienzvorgaben und Schadstoffgrenzwerte einzuhalten.

Teilkriterium 12.2 Anpassungsbedarf

Stromsektor

Der Anpassungsbedarf von Bioenergie-technologien im Stromsektor leitet sich aus den in Teilkriterium 12.1 dargestellten Rückwirkungen ab und adressiert vorrangig Kenngrößen, die eine Stromerzeugung mit möglichst hohen Freiheitsgraden erlaubt. Dazu müssen Anlagen eine große Regelbreite zwischen maximaler und minimaler Last aufweisen und beide Betriebszustände auch für einen definierten Zeitrahmen aufrechterhalten können. Weiterhin ist für bestimmte Anwendungen auch ein Mindestmaß an Laständerungsgeschwindigkeit notwendig, um auf Änderungen reagieren zu können. Die Möglichkeit zum Teillastbetrieb ist bei Anwendungen im Rahmen des Gesamtsystems nicht notwendig, da in einem großen Anlagenpool eine Skalierung der Leistung durch Zu- und Abschalten von Einzelanlagen erreicht werden kann. Für Anwendungen in Inselsystemen oder zur anteiligen Eigenstromversorgung kann aber auch eine Teillastfähigkeit gefordert sein, um die Erzeugung mit dem entsprechenden Verbrauchsprofil zu synchronisieren.

Wärmesektor

Der technologische Anpassungsbedarf im Wärmesektor wird im Folgenden zum einen für die reine Wärmeerzeugung und zum anderen auch für KWK-Anwendungen dargestellt.

Im Bereich der reinen Wärmeerzeugung ist es vor allem hinsichtlich der steigenden Bedeutung multivalenter Systeme, in denen Bioenergie vorrangig zur Abdeckung von Lastspitzen zum Einsatz kommt, wichtig, dass Feuerungsanlagen eine gute Steuerbarkeit besitzen, um nahtlos mit anderen Erzeugungsformen, Wärmespeichern oder Wärmenetzen interagieren zu können.

Für KWK-Anlagen, die auch wärmegeführt betrieben werden können, spielen neben der Einbindung in Wärmeversorgungssysteme auch eine entsprechende Verknüpfung

fung mit dem Stromsystem eine Rolle. Beispielgebend sollen hier Mikro-Wärme-Kraft-Kopplungs-Anlagen genannt werden, die in Ein- und Mehrfamilienhäusern zum Einsatz kommen können und dabei regelungstechnisch sowohl in die Wärme- als auch in die Stromversorgung eingebunden werden müssen. Besondere Bedeutung haben dabei prognosebasierte Regelalgorithmen wie es beispielsweise modellprädiktive Regler, um das komplexe Zusammenspiel verschiedener Komponenten zu optimieren.

IKT-Technologien spielen auch hier eine zunehmend wichtige Rolle, da hier eine bidirektionale, informationstechnische Verknüpfung erforderlich wird. Dies ist sowohl für den Ist-Zustand als auch für die Prognose entscheidend (Verknüpfung von Wärmebedarfsprognosen mit Wind- und PV-Leistungsprognosen).

Mobilitätssektor

Im Mobilitätssektor wird es entscheidend darauf ankommen, welche Rolle flüssige und gasförmige Energieträger zukünftig spielen werden, da biogene Energieträger im Mobilitätssektor vorrangig direkt als Kraftstoffe eingesetzt werden. Mittelbar wird zwar auch der Stromeinsatz im Bereich der Mobilität Auswirkungen auf die Strombereitstellung haben, es dürfte aber nur in Einzelfällen eine direkte Verbindung zwischen Bioenergiebereitstellung und strombasierter Mobilität geben.

Die bisher dominierende Option der Beimischung von biogenem Diesel oder Ottokraftstoffen ist neben der Möglichkeit biogener Reinkraftstoffe oft mit geringeren Anpassungsbedarfen bei der Tankstelleninfrastruktur und der Fahrzeugflotte verbunden. Der Einsatz von Reinkraftstoffen ist in Abhängigkeit der jeweiligen Kraftstoffqualitäten gegebenenfalls an technische Anpassung bei der Kraftstofflogistik und den Motoren gebunden, wobei dieser Aspekt vor allem als Nischenanwendung im landwirtschaftlichen Kontext eine Rolle spielt.

Teilkriterium 12.3 Wechselwirkungen

Stromsektor

Im Stromsektor ergeben sich auf Grund der Möglichkeit steuerbare Erzeugungsanlagen aus dem Bioenergieanalgenpark zum Ausgleich schwankender Residuallasten und zur Bereitstellung von Systemdienstleistungen wie Regelenergie einzusetzen potentiell Konkurrenzen oder Synergien zu anderen Flexibilitätsoptionen. Eine hohe Systemkompatibilität von Bioenergietechnologien knüpft sich also in erster Linie an die Möglichkeiten konkreter Konzepte, die systemseitigen Anforderungen für den Residuallastausgleich oder den Regelenergiemarkt zu erfüllen. Dem gegenüber ist eine heute noch verbreitete konstante Betriebsweise mit Bandeinspeisung bei zunehmenden EE-Anteilen im Stromsektor als problematisch zu bewerten. Es ergibt sich damit ein Zusammenhang zum Bedarf weiterer Flexibilitätsoptionen und dem Flexibilisierungsgrad des Anlagenportfolios im Stromsystem. Denn je weniger Bioenergieanalgen als „Must Run Units“ in Zeiten niedriger Residuallasten die Abregelung von volatilen Erzeugungseinheiten provozieren und anstatt dessen als steuerbare Erzeugungsanlagen solche Schwankungen ausregeln können, desto besser sind diese zum zukünftigen Energiesystem kompatibel.

Wärmesektor

Im Wärmesektor ergeben sich gegenüber dem Stromsektor die bereits in Teilkriterium 12.1 dargestellten Wechselwirkungen im Falle von KWK-Anwendungen. Sowohl für KWK-Anwendungen als auch im Bereich der reinen Wärmeerzeugung ist zu beachten, dass sich durch den Einsatz von Effizienz- und Suffizienzmaßnahmen die Anforderungsprofile von Wärmesenken in der Zukunft verändern werden. Exemplarisch soll dazu die Wärmeversorgung von Ein- und Mehrfamilienhäusern genannt werden, die bei zunehmender Energieeinsparung zum einen absolut weniger Energie verbrauchen werden und zum anderen in Kombination mit solarthermischen Anwendungen nur noch kurzzeitige und geringe Restbedarfe zu bedienen sein werden. Die Auslegung von Systemkomponenten muss also zukünftig noch besser aufeinander abgestimmt sein, damit bei hoher Versorgungssicherheit Systeme nicht überdimensioniert werden und optimal zusammenarbeiten.

Mobilitätssektor

Im Mobilitätssektor ergeben sich vielfältige Wechselwirkungen, die vor allen auf Seiten der eingesetzten Rohstoffe entstehen. So sind die Kostenstrukturen und die Verfügbarkeit von Biokraftstoffen, abgesehen von verwertbaren Abfallfraktionen, deren Potenzial aber begrenzt ist, eine Rückwirkung in der Konversionskette. Anreizsysteme für biogene Kraftstoffe können als Pull-Faktoren die Nachfrage nach bestimmten Biomassen erhöhen und so generell die Nachfrage und damit Preise nach land- und forstwirtschaftlichen Biomasse erhöhen. Das für diese Technologiegruppe stellvertretende Konzept „SynBioPtX“ zeigt darüber hinaus die Optionen zur Sektorkopplung von Strom- und Mobilität über Elektrolysewasserstoff. Die Umwandlung von Strom über den „Power-to-Gas“-Prozess in Wasserstoff kann eine Verbindung zwischen dem Stromsektor und dem Mobilitätssektor über strombasierte Kraftstoffe schaffen. Biomasse bietet für diesen Ansatz eine ideale Schnittstelle, da für strombasierte flüssige Energieträger zwingend eine Kohlenstoffquelle erforderlich ist, die als „Wasserstoffvehikel“ dient. Darüber hinaus, kann über die Verknüpfung von PtG und der Aufladung von biogenen Energieträgern, die Wertigkeit von knappen Biomasseressourcen erhöht und damit eine Steigerung der Flächeneffizienz erreicht werden.

5 F&E-Empfehlungen für die öffentliche Hand

5.1 Einleitung

Damit Bioenergie in der Energiewende die Potenziale zum Erreichen weitgehend klimagasneutraler Versorgungssysteme erschließen kann, sind umfangreiche Weiterentwicklungen notwendig. Diese umfassen (1) die Sicherstellung der emissionsarmen und effizienten Konversion, (2) die (Weiter)Entwicklung einer smarten Bioenergienutzung in teilweise kleineren, sehr präzise geregelten Anlagen und integrierten Versorgungssystemen und (3) die Verbindung mit strombasierten Syntheseverfahren. Die Grundvoraussetzung für diese Entwicklung liegt in der Kontinuität der Forschung und der politischen Rahmenbedingungen. Dies impliziert technische, aber auch organisatorische und ordnungsrechtliche Maßnahmen. So müssen die entsprechenden Anreize gesetzt werden, damit die Wirtschaft zusammen mit der Wissenschaft entsprechende (System-)Lösungen entwickeln und später unter Wertschöpfung national wie international vermarkten kann (Baur et al. 2014).

Die Bedeutung einer nachhaltigen Rohstoffbereitstellung geht deutlich über die Bereitstellung von Energie aus Biomasse hinaus. Erwartete Steigerungen im Nahrungsmittelbedarf, vielfältige Bemühungen einer stärker auf erneuerbaren Ressourcen basierenden Chemie-, Bau- und Konsumgüterindustrie (Bioökonomie) erfordern eine nachhaltige Ressourcenbereitstellung. Mit den Anforderungen und Erfahrungen der Nachhaltigkeitszertifizierung für flüssige Bioenergieträger bestehen hier erprobte Ansätze, die es weiter zu entwickeln gilt. Darüber hinaus ist eine Einbettung der Bioenergie Diskussion in einen sachlichen Diskurs um erneuerbare Energien („Vermaisung“, „Verspargelung“ als populäre Stichwörter) durch geeignete Methoden aus der Akzeptanz-, Kommunikations und sozio-ökonomischen Forschung notwendig. Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass Bioenergiekonzepte im Sinne einer „vollständigen Systemintegration“ die Landwirtschaft insgesamt nachhaltiger machen können.

Die folgenden Forschungsbausteine sind die Basis für die (Weiter)Entwicklung einer smarten Bioenergienutzung in kleinen, sehr präzise geregelten Anlagen und integrierten Versorgungssystemen mit dem Ziel, einen Beitrag zu einer nachhaltigen Energieversorgung beizutragen. Eine wesentliche Grundvoraussetzung für eine erfolgreiche Realisierung dieser Ziele ist eine langfristig ausgerichtete Forschungs- und Entwicklungsstrategie, mit der die hier skizzierten Aufgaben kontinuierlich verfolgt werden können. Allgemein generiert der bereits mehrfach dargestellte Bedarf für die Flexibilisierung der Anlagen einen zunehmenden Bedarf für eine aktive, automatisierte Steuerung von Komponenten, Anlagen und Anlagenverbünden. Die damit steigenden Datenmengen können nur mit effizienten IKT-Lösungen verarbeitet, zwischen den Systemkomponenten übertragen und verarbeitet werden. IKT fördert so die Kosteneffizienz und ermöglicht zeitgerechte Abläufe und Entscheidungen. Hierzu braucht es folgende Lösungen:

- Konzepte und Verfahren für robuste Kommunikation (IKT-Sicherheit)
- Harmonisierung der Daten- und Kommunikationsprotokolle
- Datenschutz und -sicherheit für sensible Infrastrukturen
- Intelligente Zähl- und Messkonzepte als Basis für neue Vermarktungskonzepte

5.2 F&E Empfehlungen für die Technologiegruppe „Biochemische Biomassekonversion“

Kurz- bis mittelfristig ist bei der biochemischen Biomassekonversion auch weiterhin das Innovationspotenzial für die flexible Strom- und Wärmebereitstellung zu forcieren. Neben dem Forschungsbedarf von hochflexiblen Anlagenkonzepten in Bezug auf Strom und Wärme sind weiterhin Anstrengungen zu unternehmen, Rohstoffe aus dem Rest- und Abfallstoffbereich besser zu erschließen. Vor dem Hintergrund, dass in den kommenden Jahren viele der Bestandsanlagen aus dem EEG ausscheiden und auch nicht für alle Betreiber die Option einer zweiten Vergütungsphase im Rahmen des Ausschreibungsdesigns in Frage kommt, sind geeignete Nachnutzungskonzepte für die Anlagenstandorte zu entwickeln. Insbesondere liegt hier ein Innovationspotenzial in der Integration der Vergärungsanlagen in bestehende Nutzungen. Auch eine Einbindung von Anlagen in lokale Quartierskonzepte im ländlichen Raum sowie die Verknüpfung mit stofflichen Nutzungskonzepten kann hier eine Option sein.

5.2.1 Flexibilisierung der Energiebereitstellung

Die Herausforderung bei der Entwicklung von hochflexiblen Anlagenkonzepten hinsichtlich Substrat und Energieoutput erfordern:

- Prozessüberwachung und -kontrolle für eine flexible Biogasproduktion
- Erweiterung des Flexibilitätsbereichs der Anlagen
- Konzepte zur Integration ins Energiesystem und Kombination mit anderen Erneuerbaren Energien und Flexibilitätsoptionen
- Integration flexibler Bioenergieanlagen in vernetzte Steuerungs- und Vermarktungsmodelle wie virtuelle Kraftwerke oder smart grids bzw. micro grids
- Innovative Implementierung in alternative Konzepte zur Netzplanung und dem proaktiven Netzmanagement
- Optimierung und Modifikation des Anlagenbestandes zur Umsetzung neuartiger Wärmekonzepte oder Gasaufbereitung und -einspeisung
- Ganzheitliche Effizienzsteigerung trotz Zielkonflikten bei der flexiblen Strom- und Wärmeerzeugung

5.2.2 Rohstoffbasis

Entsprechend verschiedener Energiewendeszenarien (Nitsch 2015) wird auch in Zukunft von einem moderaten Anstieg der energetischen Biomassenutzung ausgegangen. Einen Großteil des bisher ungenutzten Ausbaupotenzials, das noch begrenzt ausbaufähig ist, stellen die bisher ungenutzten Rest- und Abfallstoffe dar (Brosowski et al. 2015). Erhebliche Unterschiede zwischen Rest-/Abfallstoffen und Anbaubiomasse bestehen vor allem im Hinblick auf die eingesetzten Techniken zur Aufbereitung, Umwandlung und Nutzung. Entsprechende Techniken und Prozesse müssen daher weiterentwickelt werden, um die noch ungenutzten Potenziale heben zu können. Dabei sind vor allem folgende Punkte relevant:

- Substrat- und Prozessflexibilisierung bei gleichzeitig stabiler Betriebsführung

- Konzepte zur verstärkten Nutzung von Rest- und Abfallstoffen unter Berücksichtigung schwankender Substratqualität und -verfügbarkeit
- Integration alternativer Pflanzen und Anbauverfahren auch im Kontext der Nahrungs- und Futtermittelproduktion

5.2.3 Kostenreduzierung, Effizienzsteigerung, Emissionsminderung

Die biochemische Biomassekonversion steht insbesondere mit der Biogastechnologie vor der Herausforderung, wachsende Ansprüche auf Seiten des Energiesystems und der Regulierung mit einem zunehmenden Druck zur Kostensenkung zu vereinbaren. Um in diesem Spannungsfeld den vielfältigen gesellschaftlichen Ansprüchen gerecht zu werden, erfordert es:

- Methoden zur Emissionsmessung und passende Minderungsmaßnahmen
- Entwicklung von Prozesssensorik zur Überwachung und Automatisierung
- Identifikation und Bewertung von Parametern zur Prozesssteuerung
- Integration von Biogasanlagen in bestehende Infrastrukturen unter Nutzbarmachung von Energie- und Stoffströmen
- Kombination stofflicher und energetischer Nutzungsstrategien

5.3 F&E Empfehlungen für die Technologiegruppe „Thermo-chemische Konversion“

Durch Markteinführungsprogramme und gezielte Forschung sollte der Übergang von der reinen Wärme- zur gekoppelten Strom- und Wärmeerzeugung unterstützt werden. Thermo-chemische Konversionsanlagen werden künftig häufiger mit solar-thermischen Anlagen zur Nutzung der Umgebungswärme oder mit mikrobiellen Biomethanerzeugungsanlagen verbunden. Dazu ist die Erforschung und Entwicklung von Systemreglern (Prognoseverfahren, Algorithmen, Modelle) zur flexiblen Integration in erneuerbare Versorgungskonzepte notwendig.

5.3.1 Flexibilisierung der Energiebereitstellung

Für die Technologieadaptation der heute überwiegend im Intervall- bzw. Dauerbetrieb befindlichen Anlagen sind Fragen zur Prozessflexibilisierung im Bereich der thermodynamischen und thermo-chemischen Grundlagenforschung erforderlich. Über alle Leistungsbereiche von Vergasungstechnologien besteht Forschungs- und Entwicklungsbedarf in den Bereichen Wärmerückführung, Minimierung von Aufbereitungsverlusten und Verbesserung der Gasreinigung. Vor dem Hintergrund der Anforderungen des Stromsystems sollten die technischen Lösungen für regelbare und örtlich kombinierbare Systeme (Flexibilisierung der KWK-Systeme, Stabilisierung der fluktuierenden Stromerzeugung bei stimmigen Wärmekonzept) vorangetrieben werden. Generell sollten zukünftige Konzepte hohe elektrische bzw. Gesamteffizienzen aufweisen und hohe Lastwechselraten ermöglichen.

5.3.2 Rohstoffbasis

Besonders im kleintechnischen und mittleren Bereich bestehen Potenziale im Ausbau der Rohstoffvarianz (Rest- und Abfallstoffe) durch entsprechende Aufbereitungsverfahren (Zerkleinern, Waschen, Mischen, Kompaktieren, Torrefizieren, hydrothermale Behandlung). Bisher verursachen ungünstige Rohstoffparameter (z. B. höhere Asche- oder Wassergehalte, geringere Ascheschmelztemperaturen) noch zu hohe Probleme in der Produktgasqualität.

5.3.3 Kostenreduzierung, Effizienzsteigerung, Emissionsminderung

Hohes Entwicklungspotenzial liegt in der Vergasungstechnologie, zukünftig insbesondere im kleinen Leistungsbereich. Hier kann mittels optimierter Motoren oder Brennstoffzellen eine höhere elektrische Effizienz, Kostensenkung und damit ein Technologiesprung erreicht werden. Die Forschung in die Entwicklung und Anwendung von Brennstoffzellen sollte intensiviert werden. Forschungsbedarf liegt hier vor allem auch in der Erhöhung und Stabilisierung der Gasqualitäten und Standzeiten der Brennstoffzellenstacks. Bisher tragen vor allem schwankende Gasqualitäten erheblich zur Degradation der Brennstoffzellen bei. Generell haben Verunreinigungen wie Staub und Aschepartikel, sowie besonders höhere Kohlenwasserstoffe, wie Teer einen wesentlichen Einfluss auf die Qualität des Produktgases in den Arbeitsmaschinen zur Kraft-Wärme-Kopplung und bei Brennstoffzellen.

Um die Emissionen im Bereich staub- und gasförmiger Schadstoffemissionen (Gesamtstaub, PM_{10} , CO , C_nH_m und NO_x) noch weiter zu senken, sollten weitere Forschungsanstrengungen bzgl. Minderungsmaßnahmen und Methoden zur effektiven Emissionsminderung vorangetrieben werden. Es gilt daher Maßnahmen weiterzuentwickeln, mit denen die Emissionen am effektivsten, kostengünstigsten, sicher und langzeitstabil unter angestrebte Grenzwerte gesenkt werden können (z. B. auch katalytische Verfahren).

Als wichtige Infrastrukturtechnologie sollte auch die F&E-Aktivität für Wärmenetze und Wärmespeicher intensiviert werden, da hierdurch eine Erhöhung der KWK-Nutzungsgrade aus der Biomasse-Verstromung ermöglicht wird.

5.4 F&E Empfehlungen für das SynBioPtX als hybride Bioraffinerie

Bisher wurden die möglichen Synergien und integrativen Ansätze von Technologien zur Konversion von Biomasse und erneuerbarem Strom zu innovativen Produkten (Biomass- bzw. Power-to-X) für die stoffliche und energetische Verwertung nur unzureichend betrachtet. Für einzelne Konversionsprozesse wurde dazu bereits eine Reihe von Technologieansätzen entwickelt. Förderbedarf besteht allerdings für Vorhaben, die einzelne Konversionstechnologien so miteinander kombinieren, dass sich synergistische Effekte durch eine hohe Prozessintegration ergeben. Durch die Förderung von Pilot- und Demonstrationsvorhaben für solcherart integrierte bzw. hybride Bioraffinerien ist insbesondere mit Effizienzsteigerungen, Emissionsminderungen sowie Kostenreduzierungen zu rechnen. Neben technischen Lösungen sind auch dazu passende langfristige politische Rahmenbedingungen zu entwickeln, um ein Umfeld zu schaffen, in dem die Errichtung hybrider Bioraffinerien über die in der Industrie üblichen Abschreibungszeiträume ökonomisch tragfähig wird. Erst damit

wird die Kommerzialisierung von einzelnen Konzepten für die industrielle Anwendung interessant und die potentiellen Effizienzsteigerungen und Kostenreduzierungen praktisch realisierbar.

5.4.1 Flexibilisierung der Energiebereitstellung

Hybride Bioraffinerien sind überwiegend als Senken für elektrischen Strom zu betrachten, den diese zusammen mit Biomasse in stofflicher Form (gasförmige oder/ und flüssige Energieträger) speichern. Durch die Erzeugung von chemischen Energieträgern wird eine hohe Flexibilisierung der späteren Energiebereitstellung gewährleistet, da die erzeugten Kraftstoffe flexibel und bedarfsorientiert genutzt werden können. Großer Förderbedarf besteht hierbei für Vorhaben und Konzeptentwicklungen, die lastflexible Fahrweisen bezogen auf den Stromverbrauch von Bioraffinerien ermöglichen, ohne dass die dafür notwendigen Investitionskosten im Vergleich zu Konzepten mit konstanter Fahrweise stark ansteigen. Solche Anlagen sind als langfristiges Ziel im zukünftigen Energiesystem notwendig, wenn große, zeitlich variable Überschüsse an Elektrizität auftreten und zwischengespeichert werden müssen und gleichzeitig keine zusätzlichen unflexiblen Lasten im Stromsystem erzeugt werden sollen. Für eine hohe räumliche Flexibilität der Energiebereitstellung sind gut ausgebaute Energieinfrastrukturen für erneuerbare Energieträger notwendig, die für Methan und flüssige Kraftstoffe bereits vorhanden sind. Vorhaben, die die Verbesserung und den Umbau dieser Infrastrukturen für flexible erneuerbare Energieträger zum Ziel haben, können die Fähigkeiten der vorhandenen Infrastrukturen weiter erhöhen.

Eine räumliche und zeitliche Entkopplung zwischen Energieerzeugung und Energieverbrauch kann dabei die Elektrizitätsnetze entlasten und damit einen Teil der zukünftig wachsenden Lastschwankungen durch die Verlagerung auf andere Infrastrukturen ausgleichen. Sinnvoll ist in diesem Zusammenhang die Förderung von Vorhaben, die bestehende Technologien zur Strom- und Wärmeerzeugung verbessern bzw. neue Prozesse entwickeln. Effizienzsteigerungen im Bereich der Rückverstromung von chemischen Energieträgern sind zwingend notwendig, um den Gesamtwirkungsgrad der Kette Strom → Speicher → Strom zu erhöhen. Entsprechend sollten Vorhaben zur Kraft-Wärme-Kopplung oder reinen Strombereitstellung gefördert werden, wenn der zu erwartende elektrische Wirkungsgrad signifikant über den Stand der Technik hinausgehen, damit die bisher hohen Verluste bei der Rückverstromung reduziert werden.

5.4.2 Rohstoffbasis

Zentraler Forschungsbedarf besteht in der Kopplung von Vergasungs- und Pyrolyseprozessen sowie biologischen Prozessen (Biogas- und Bioethanolanlagen) mit Syntheseprozessen zur Erzeugung von Plattformchemikalien und Energieträgern (u. a. Methan, Methanol, höhere Kohlenwasserstoffe, Alkene). Mit Vergasungs- und Pyrolyseprozessen lässt sich potentiell ein breites Spektrum an Biomassesubstraten (Rest- und Abfallstoffe mit lokal und saisonal schwankenden Qualitäten) erschließen, wobei hierzu gezielt die Entwicklung von rohstoffflexiblen Gaserzeugern gefördert werden sollte um zukünftig günstige Brennstoffe erschließen zu können. Viele Synthesetechnologien, die klassisches Synthesegas (H_2 und CO) aus fossilen Rohstoffen

einsetzen, sind bereits kommerziell verfügbar. Entsprechende Technologien, die mit Biomasse als Rohstoffquelle arbeiten, werden gerade demonstriert (ETIB 2017). Abgeleitete Technologien, die Synthesegas aus H_2 und CO_2 einsetzen, werden ebenfalls gerade in Pilot- und Demonstrationsvorhaben entwickelt (Methan-, Methanol-, Ethanol-, Fischer-Tropsch-Synthese). Weiterer Förderbedarf besteht allerdings für die Nutzung von CO_2 aus etablierten Industrieprozessen. Hier sollte insbesondere ein Programm für kleine und mittlere Unternehmen, bei denen CO_2 -reiche Abgasströme auftreten, aufgesetzt werden. Dabei sollten zuerst Konzepte entwickelt und nachfolgende Umsetzungsstrategien entwickelt werden. So können unternehmensspezifische Optionen für zukünftige Anforderungen an „Null-Emission-Technologien“ eingeordnet und im Idealfall umgesetzt werden. Wenig Beachtung fand bisher die Synthese von erneuerbaren Alkenen, die wichtige Plattformchemikalien für die chemische Industrie darstellen. Grundlagenuntersuchungen in diesem Bereich liegen vor, jedoch besteht ein Mangel an Vorhaben, die die Alkensynthese im Technikums- und Pilotmaßstab weiterentwickeln. Außerdem sind hydrothermale Prozesse, die vielfältige Rest- und Abfallstoffe aufbereiten können, so dass diese in Vergasungs- und Pyrolyseprozessen eingesetzt werden können, von Bedeutung. Neben der Förderung von Vorhaben zur hydrothermalen Karbonisierung kann hierbei die Förderung von anderen hydrothermalen Prozessen sinnvoll sein, so dass zukünftig möglichst alle Rest- und Abfallströme vollständig verwertet werden können.

5.4.3 Kostenreduzierung, Effizienzsteigerung, Emissionsminderung

Hybride Bioraffinerien müssen zur Ausschöpfung der hohen Effizienzpotenziale der Reduktion von Emissionen und Kosten einen hohen Integrationsgrad der eingesetzten Einzelprozesse aufweisen. Um dies zu fördern, sind Pilot- und Demonstrationsvorhaben, die Synthesegas als Zwischenprodukt für die Bereitstellung von flüssigen und gasförmigen Energieträgern nutzen, notwendig. Das IH^2 -Projekt (Marker et al. 2012) stellt ein gutes Beispiel für ein solches Pilotvorhaben dar. Die Erzeugung von erneuerbaren Energieträgern und Plattformchemikalien, die fossile Stoffe direkt substituieren können, aber nicht aus Nahrungsmitteln hergestellt werden (SNG, Fischer-Tropsch-Kraftstoffe, Biokohle, Alkene), ist in einzelnen Vorhaben zu fördern. Dabei sollten mittel- bis langfristig politische und finanzielle Rahmenbedingungen geschaffen werden, die einen wirtschaftlichen Betrieb von hybriden Bioraffinerien erlauben.

Literaturverzeichnis

- Barisic, Zeljko; Baumann, Frank-Michael; Bernard, Jörg; Ebert, Günther; Grimm, Christiane; Hartmann, Hans; et al. (2015): Statusreport Regenerative Energien in Deutschland 2015. VDI.
https://www.vdi.de/fileadmin/user_upload/Statusreport_Regenerative_Energien_-_WEB.pdf.
- Baur, Frank; Krautkremer, Bernd; Wörner, Antje (2014): Die Rolle der Bioenergie für das Strom-Wärme-System. Saarbrücken.
http://www.fvee.de/fileadmin/publikationen/Themenhefte/th2013-2/th2013_06_02.pdf. Letzter Zugriff: 25.04.2017.
- Baur, Frank; Noll, Florian; Wern, Bernhard; Vogler, Cornelia; Weiler, Katja; Arnold, Karin; et al. (2015): Nachhaltige Integration von Bioenergiesystemen im Kontext einer kommunalen Entscheidungsfindung. KomInteg. Institut für ZukunftsEnergieSysteme.
http://www.izes.de/cms/upload/publikationen/ST_12_061.pdf.
- Beil, Michael; Lohmann, Heiko; Kramer, Rainer; Sarge, Stefan; Anders, Bert; Böckler, Hans-Benjamin (2016): Schlussbericht - Monitoring des Biomethanproduktionsprozesses „MONA“. Kassel. <http://www.fnr-server.de/ftp/pdf/berichte/22011009.pdf>. Letzter Zugriff: 12.07.2017.
- BMWi (2016a): Zeitreihen zur Entwicklung der Erneuerbaren Energien in Deutschland. http://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/zeitreihen-zur-entwicklung-der-erneuerbaren-energien-in-deutschland-1990-2015-excel.xls?__blob=publicationFile&v=9.
- BMWi (2016b): Erneuerbare Energien in Zahlen - nationale und internationale Entwicklung. Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie.
https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/erneuerbare-energien-in-zahlen-2015.pdf?__blob=publicationFile&v=6.
- BMWi (2017): Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland im Jahr 2015. Informationsportal Erneuerbare Energien. http://www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigation/DE/Service/Erneuerbare_Energien_in_Zahlen/Entwicklung_der_erneuerbaren_Energien_in_Deutschland/entwicklung_der_erneuerbaren_energien_in_deutschland_im_jahr_2015.html.
- Brosowski, André; Adler, Philipp; Erdmann, Georgia; Stinner, Walter; Thrän, Daniela; Mantau, Udo; et al. (2015): Biomassepotenziale von Rest- und Abfallstoffen - Status Quo in Deutschland. Schriftenreihe Nachhaltige Rohstoffe 36.
https://www.bioliq.de/downloads/schriftenreihe_band_36_web_01_09_15.pdf. Letzter Zugriff: 17.07.2017.
- Daniel-Gromke, Jaqueline; Rensberg, Nadja; Schüch, Andrea (2014): Ein Überblick - Potenziale, Techniken und Perspektiven von zukünftigen Substraten im Biogassektor. In: Michael Nelles (Hrsg.), Tagungsband DBFZ-Jahrestagung Bio-

- energie. Vielseitig, sicher, wirtschaftlich, sauber?! 37-44. Leipzig.
https://www.dbfz.de/fileadmin/user_upload/Referenzen/Schriftenreihen/Tagungsband/DBFZ_Jahrestagung_2014.pdf.
- DECHEMA e.V. (2016): Fortschrittliche alternative flüssige Brenn- und Kraftstoffe: Für Klimaschutz im globalen Rohstoffwandel. Positionspapier des Temporären Arbeitskreises „Alternative Brenn- und Kraftstoffe“ der ProcessNet. empörerer ProcessNet Arbeitskreis „Alternative Brenn- und Kraftstoffe“.
- Deutscher Bundestag (2009): Nationaler Biomasseaktionsplan für Deutschland - Drucksache 16/12955. Berlin.
<http://dipbt.bundestag.de/dip21/btd/16/129/1612955.pdf>.
- Dotzauer, Martin; Hennig, Christiane; Lenz, Volker; Brosowski, André; Trommler, Marcus; Barchmann, Tino; et al. (2016): Entwicklung der Biomasseverstromung bei Fortschreibung der aktuellen EEG-Vergütung. Leipzig: Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH (DBFZ). <http://www.fnr-server.de/ftp/pdf/berichte/22400815.pdf>.
- Europäische Kommission (EC) (2017): Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen (Neufassung). [http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/HTML/?uri=CELEX:52016PC0767R\(01\)&from=EN](http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/HTML/?uri=CELEX:52016PC0767R(01)&from=EN). Letzter Zugriff: 12.07.2017.
- EEA (2013): EU bioenergy potential from a resource-efficiency perspective. Copenhagen: European Environment Agency.
<http://www.eea.europa.eu/publications/eu-bioenergy-potential>.
- EEG 2014 (2014): Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz – EEG 2014). https://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/eeg_2014/gesamt.pdf.
- EEG 2017 (2016): Erneuerbare-Energien-Gesetz vom 21. Juli 2014 (BGBl. I S. 1066), das zuletzt durch Artikel 2 des Gesetzes vom 22. Dezember 2016 (BGBl. I S. 3106) geändert worden ist. https://www.gesetze-im-internet.de/eeg_2014/BJNR106610014.html.
- Ehrenstein, Ulrike; Strauch, Sabine; Hildebrand, Jan (2012): Akzeptanz von Biogasanlagen. Hintergrund, Analyse und Empfehlungen für die Praxis. Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT.
<http://www.umsicht.fraunhofer.de/content/dam/umsicht/de/dokumente/energie/akzeptanz-biogasanlagen-120410.pdf>.
- Eltrop, Ludger (Hrsg.) (2014): Leitfaden feste Biobrennstoffe: [Planung, Betrieb und Wirtschaftlichkeit von Bioenergieanlagen im mittleren und großen Leistungsbereich] (4., vollst. überarb. Aufl.). Gülzow-Prüzen: FNR.
- ETIB (2017): FT-Liquids & Biomass to Liquids (BtL). ETIP Bioenergy-SABS.
http://www.etipbioenergy.eu/?option=com_content&view=article&id=277.

- EWE AG (2014): IKT für eine erfolgreiche Energiewende - Ausgewählte Anwendungsfelder und politische Handlungsempfehlungen. Positionspapier von EWE AG.
- Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (Hrsg.) (2013): Leitfaden Biogas: von der Gewinnung zur Nutzung ; Bioenergie. biogas.fnr.de (6., überarb. Aufl.). Gülzow-Prüzen: FNR.
- Fachverband Biogas e.V. (FVB) (2014): Änderungsbedarf beim EEG-Arbeitsentwurf des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie.
<http://www.umweltgutachter.de/uploads/images/02g4ja4wrfkXY5b8uTCVZQ/140214-fachverband-biogas-bewertung-vorschlaege-bmwi-eeg-2014-arbeitsentwurf-umweltgutachter-omnicert.pdf>.
- FNR (2016): FNR - Biokraftstoffe: Aktuelle Marktsituation.
<https://biokraftstoffe.fnr.de/kraftstoffe/aktuelle-marktsituation/>. Letzter Zugriff: 27.04.2017.
- Foster, Edward; Contestabile, Marcello; Blazquez, Jorge; Manzano, Baltasar; Workman, Mark; Shah, Nilay (2017): The unstudied barriers to widespread renewable energy deployment: Fossil fuel price responses. Energy Policy 103 (2017) 258–264.
- Fraunhofer IWES (Hrsg.) (2012): Landkreis als Vorreiter, Regenerative Modellregion Harz. Abschlussbericht. Kassel: BMWi. <http://www.regmodharz.de/>.
- Fraunhofer IWES; IPB; Ifeu (2015): Interaktion EE Strom, Wärme und Verkehr. Analyse der Interaktion zwischen den Sektoren Strom, Wärme/Kälte und Verkehr in Deutschland in Hinblick auf steigende Anteile fluktuierender Erneuerbarer Energien im Strombereich unter Berücksichtigung der europäischen Entwicklung. BMWi.
- Full, Johannes (2015): Abschlussbericht zur Veröffentlichung „Benzolminderung bei Holzgasbetriebenen KWK-Anlagen“. Freinburg: Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE. https://www.energetische-biomassenutzung.de/fileadmin/user_upload/Steckbriefe/dokumente/03KB077_HolzgasPlus_Schlussbericht-150921-final.pdf.
- FVEE (2016): Forschung für die Wärmewende - Beiträge zur FVEE-Jahrestagung 2015. Forschungsverbund Erneuerbare Energien.
<http://www.fvee.de/fileadmin/publikationen/Themenhefte/th2015/th2015.pdf>.
- Hamm, Ulrich; El-Chichakli, Beate (2015): A Global Vision for Bioeconomy - an International Delphi-Study. Global Bioeconomy Summit, Berlin.
http://gbs2015.com/fileadmin/gbs2015/Downloads/A_Global_Vision_for_Bioeconomy_Hamm.pdf.
- Hartmann, Ingo; Lenz, Volker (2014): Wissenschaftliche Einblicke zur Emissionsminderung bei Biomasse-Kleinfeuerungen. In: Michael Nelles (Hrsg.), DBFZ-Jahrestagung Bioenergie. Vielseitig, sicher, wirtschaftlich, sauber?! 118-129. Leipzig.

https://www.dbfz.de/fileadmin/user_upload/Referenzen/Schriftenreihen/Tagungsband/DBFZ_Jahrestagung_2014.pdf

Hauser, Eva; Wern, Bernhard; Pertagnol, Joachim (2016): Bioenergie auf dem Weg zu einem dekarbonisierten Energiesektor bis 2050: einige energiewirtschaftliche und –politische Implikationen. DBFZ-Tagungsband, Nr. 3. 2. DBFZ-Jahrestagung 2016 Smart Bioenergy - Wie sieht die Zukunft der Bioenergie aus?, Leipzig: DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH.

https://www.dbfz.de/fileadmin/user_upload/Referenzen/Schriftenreihen/Tagungsband/DBFZ_Jahrestagung_2016.pdf. Letzter Zugriff: 26.04.2017.

Henning, Hans-Martin; Palzer, Andreas; Borggreffe, Frieder; Pape, Carsten; Jachmann, Henning; Fischendick, Manfred (2015): Phasen der Transformation des Energiesystems – Ein ganzheitlicher Blick auf alle Wandlungsketten und Verbrauchssektoren. Forschung für die Energiewende – Phasenübergänge aktiv gestalten - Beiträge zur FVEE-Jahrestagung 2014.

http://www.fvee.de/fileadmin/publikationen/Themenhefte/th2014/th2014_03_02.pdf.

Hermann, Hauke; Emele, Lukas; Jörß, Wolfram; Blanck, Ruth; Ludig, Sylvie; Loreck, Charlotte; et al. (2015): Klimaschutzszenario 2050. 2. Endbericht. Öko-Institut e.V. - Institut für angewandte Ökologie.

<http://www.oeko.de/oekodoc/2451/2015-608-de.pdf>.

Holzhammer, Uwe (2015): Biogas in einer zukünftigen Energieversorgungsstruktur mit hohen Anteilen fluktuierender Erneuerbarer Energien. Schriftenreihe Umweltingenieurwesen. Rostock: Universität, Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät, Professur Abfall- und Stoffstromwirtschaft.

Hornung, Andreas (2014): Bio-Hydrogen from Biomass. Transformation of Biomass: Theory to Practice. John Wiley & Sons, Ltd.

IEA (2016a): IEA - Data Services: Detailed Country RD&D Budgets. : Beyond 20/20 WDS - Table View. <http://wds.iea.org/WDS/TableViewer/tableView.aspx>. Letzter Zugriff: 28 März 2017.

IEA (2016b): Energy Technology RD&D Budgets Database Documentation. <http://wds.iea.org/WDS/tableviewer/document.aspx?FileId=1525>.

IRENA (2014): REmap 2030. A Renewable Energy Roadmap. Abu Dhabi. www.irena.org/remap.

ISI; Consentec (noch nicht veröffentlicht): Langfristszenarien Deutschland. ISI & Consentec 2016/2017.

Kabasci, Stephan; Ehrenstein, Ulrike; Strauch, Sabine; Schweizer-Ries, Petra; Hildebrand, Jan (2012): Imageanalyse und Imagewandel der Biogastechnologie unter Einbeziehung sozialwissenschaftlicher und technologischer Aspekte. Fraunhofer UMSICHT; Forschungsgruppe Umweltpsychologie. <https://www.umsicht.fraunhofer.de/content/dam/umsicht/de/dokumente/energie/akzeptanz-biogasanlagen.pdf>.

- Kloth, Philipp (2016): Digitalisierung als Katalysator der Wärmewende.
<https://www.dialog-energie-zukunft.de/digitalisierung-katalysator-waermewende/>. Letzter Zugriff: 25.04.2017.
- Knappe, Florian; Vogt, Regine; Lazar, Silvia; Höke, Silke (2012): Optimierung der Verwertung organischer Abfälle. TEXTE 43/ 2010, Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. Umweltbundesamt, Dessau.
- Knorr, Kaspar; Zimmermann, Britta; Kirchner, Dirk; Speckmann, Markus; Spieckermann, Raphael; Widdel, Martin; et al. (2014): Kombikraftwerk 2. Abschlussbericht. Fraunhofer IWES, Siemens AG, Universität Hannover, CUBE. BMWi.
- Kreyenberg, Danny; Lischke, Andreas; Bergk, Fabian; et al. (2015): Erneuerbare Energien im Verkehr - Potentiale und Entwicklungsperspektiven verschiedener erneuerbarer Energieträger und Energieverbrauch der Verkehrsträger.
http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/MKS/mks-kurzstudie-ee-im-verkehr.pdf?__blob=publicationFile.
- Kröger, Michael; Müller-Langer, Franziska (2012): Review on possible algal-biofuel production processes. *Biofuels* 3 (3) 333–349.
- Kunz, Claudia; Kirrmann, Sven (2016): Die neue Wärmewelt - Szenario einer rein regenerativen Wärmeversorgung Deutschlands.. Im Auftrag von Bundestagsfraktion Bündnis 90 / Die Grünen. Agentur für Erneuerbare Energien e.V.
https://www.unendlich-viel-energie.de/media/file/551.AEE_Neue_Waermewelt_Online.pdf.
- Lambrecht, Udo; Müller-Langer, Franziska (2015): Alternative Energieträger im Verkehr und ihre Infrastruktur. Jahreskonferenz zur MKS „Nachhaltige Konzepte für die Energiewende im Verkehr“, Berlin.
https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/MKS/mks-jahreskonferenz-praesentation-mueller-langer-und-lambrecht.pdf?__blob=publicationFile.
- Laurens, Lieve; McMillan, James (2017): State of Technology Review – Algae Bioenergy: An IEA Bioenergy Inter-Task Strategic Project. Denver: National Renewable Energy Laboratory. <http://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2017/02/IEA-Bioenergy-Algae-report-update-Final-template-20170131.pdf>.
- Lenz, Volker; Ortwein, Andreas (2017): SmartBiomassHeat – Heat from Solid Biofuels as an Integral Part of a Future Energy System Based on Renewables. *Chemical Engineering & Technology* 40 (2) 313–322.
- Leonzio, Grazia (2017): Design and feasibility analysis of a Power-to-Gas plant in Germany. *Journal of Cleaner Production* 162 (2017) 609–623.
- Majer, Stefan; Gröngröft, Arne; Drache, Christian; Braune, Maria; Meisel, Kathleen; Müller-Langer, Franziska; Naumann, Karin; Oehmichen, Katja (2015): Technische und methodische Grundlagen der THG-Bilanzierung von Biodiesel: Handreichung (Version 1.0.). Leipzig: DBFZ.

https://www.dbfz.de/fileadmin/user_upload/Referenzen/Broschueren/Handreichung_Biodiesel.pdf.

- Marker, Terry; Linck, Martin; Felix, Larry; Ortiz-Toral, Pedro; Wangerow, Jim (2012): Biomass to Gasoline and Diesel Using Integrated Hydropyrolysis and Hydroconversion. Des Plaines, Illinois: Gas Technology Institute. <https://www.osti.gov/scitech/servlets/purl/1059031>. Letzter Zugriff: 11.07.2017.
- Matthes, Mirjam; Hartmann, Ingo (2013): Emissionsminderung durch integrierte und kombinierte Maßnahmen in Biomasse-Kleinfeuerungen - Feuerungsanlage: Multifuelkessel. 5. Statuskonferenz des BMU-Förderprogramms Energetische Biomassenutzung. Leipzig.
- Meisel, Kathleen; Braune, Maria; Gröngröft, Arne; Müller-Langer, Franziska; Naumann, Karin; Oehmichen, Katja (2015): Technische und methodische Grundlagen der THG-Bilanzierung von Bioethanol: Handreichung (Version 1.0.). Leipzig: DBFZ.
- Menken, Lars (2016): EEG-Marktscreening 2015/2016 - Erneuerbare Energien - wirklich unbegrenzt erfolgreich? Steinfurt: Gesellschaft für angewandte Marktforschung in der Energiewirtschaft (G.A.M.E.) mbH. http://www.eeg-marktscreening.de/cm4all/iproc.php/GAME%20EEG_Marktscreening_Vollversion.pdf?cdp=a.
- Müller-Langer, Franziska; Dietrich, Ralph-Uwe; Arnold, Karin; van de Krol, Roel; Harnisch, Falk (2016): Erneuerbare Kraftstoffe für Mobilität und Industrie Wie decken wir die Bedarfe von morgen? Berlin. <http://docplayer.org/34924018-Erneuerbare-kraftstoffe-fuer-mobilitaet-und-industrie-wie-decken-wir-die-bedarfe-von-morgen.html>. Letzter Zugriff: 28.03.2017.
- Nitsch, Joachim (2015): SZEN-15. Aktuelle Szenarien der deutschen Energieversorgung unter Berücksichtigung der Eckdaten des Jahres 2014. http://www.bee-ev.de/fileadmin/Publikationen/20150419-Szenarien_SZEN-15.pdf.
- Nitsch, Joachim (2016): Die Energiewende nach COP 21 – Aktuelle Szenarien der deutschen Energieversorgung. Kurzstudie für den Bundesverband Erneuerbare Energien e.V. Stuttgart. https://www.bee-ev.de/fileadmin/Publikationen/Studien/Joachim_Nitsch_Energiewende_nach_COP21.pdf.
- Nitsch, Joachim; et al. (2012): Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global – Leitstudie. Stuttgart, Kassel, Teltow: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Institut für Technische Thermodynamik, Abt. Systemanalyse und Technikbewertung, Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES), Ingenieurbüro für neue Energien (IF-NE).
- Oehmichen, Katja; Naumann, Karin; et al. (2015): Technische und methodische Grundlagen der THG-Bilanzierung von Biomethan: Handreichung (Version 1.0.). Leipzig: DBFZ.

- Öko-Institut, Fraunhofer ISI (2015): Klimaschutzszenario 2050. 2. Endbericht. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB). Berlin: Öko-Institut, Fraunhofer ISI.
- Palmeros Parada, Mar; Osseweijer, Patricia; Posada Duque, John (2016): Sustainable biorefineries, an analysis of practices for incorporating sustainability in biorefinery design. Industrial Crops and Products.
- Pfemeter, Christoph; Liptay, Peter (2014): Wärme und Strom aus Holz - Holzgasanlagen für regionale Energieversorgung. Wien.
<http://www.syncraft.at/images/syncraft/download/FO-OeBMV-Falter-Waerme-und-Strom-aus-Holz.pdf>.
- Pieprzyk, Björn; Rojas, Paula; Kunz, Claudia; Knebel, Alexander (2016): Metaanalyse über Perspektiven fester, flüssiger und gasförmiger Bioenergieträger. Berlin: Agentur für Erneuerbare Energien e.V.
http://www.forschungsradar.de/fileadmin/content/bilder/Vergleichsgrafiken/me-ta_Perspektiven_Bioenergietraeger_16/AEE_Metaanalyse_Bioenergie_Nov16.pdf. Letzter Zugriff: 25.01.2017.
- Ponitka, Jens; Arendt, Oliver; Lenz, Volker; Daniel-Gromke, Jaqueline; Stinner, Walter; Ortwein, Andreas; et al. (2016): Focus on: Bionergie im Strom- und Wärmemarkt : Projektergebnisse 2015-2016 (2. Aufl.). Leipzig: Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH. https://www.energetische-biomassenutzung.de/fileadmin/user_upload/Downloads/Ver%C3%B6ffentlichungen/fh_technologie_web_small.pdf.
- Raussen, Thomas; Kern, Michael; Richter, Felix; et al. (2016): Optimierte energetische Verwertung von Bioabfällen. Mitteldeutsche Mitteilungen. Schwerpunkt nachwachsende Rohstoffe und Pflanzentechnologie. Begleitheft des 20. Kongresses Narossa 2016 16–17.
- Rochlitz, L.; Helmes, C.; Rickart, I. (2016): Positionsbestimmung für Anlagen zur thermochemischen Vergasung von Biomasse im sich wandelnden Energiesystem. Rotenburg a.d. Fulda. http://www.fee-ev.de/1_Aktuelles/DGMK_2016_FEE_Rochlitz.pdf.
- Scheftelowitz, M.; Rensberg, N.; Denysenko, V.; Daniel-Gromke, J.; Stinner, W.; Hildebrand, K.; et al. (2015): Stromerzeugung aus Biomasse (Vorhaben IIa Biomasse). No. Zwischenbericht Mai 2015. Leipzig: DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH, IWES.
https://www.dbfz.de/fileadmin/eeg_monitoring/berichte/01_Monitoring_ZB_Mai_2015.pdf.
- Seyfert, U.; Bunzel, K.; Thrän, D.; Zeddies, J. (2011): Biomassepotentiale aus dem Energiepflanzenanbau in Deutschland. Informationen zur Raumentwicklung (5/6) 287–295.
- Sterner, M.; Bauer, F. (2016): Weltweit Null-Emissionen bis 2050. Szenarien zur globalen Dekarbonisierung auf Basis erneuerbarer Energien, Sektorenkopp-

- lung und Energiespeicher ohne negative Emissionen, Biomasse und CCS.
http://www.wbgu.de/fileadmin/user_upload/wbgu.de/templates/dateien/veroeffentlichungen/sondergutachten/sg2016/sondergutachten2016_ex02.pdf.
- Stuible, A.; Zech, D.; Wülbeck, H.-F.; Sperber, E.; Nast, M.; Hartmann, H.; et al. (2016): Evaluierung von Einzelmaßnahmen zur Nutzung erneuerbarer Energien im Wärmemarkt (Marktanreizprogramm) für den Zeitraum 2012 bis 2014. Stuttgart. https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/Berichte/evaluierung-marktanreizprogramm.pdf?__blob=publicationFile&v=5. Letzter Zugriff: 12.07.2017.
- Szarka, N.; Rönsch, C.; Lenz, V.; Thrän, D. (2016): Zukünftige Strategien der biogenen Wärmebereitstellung. DBFZ-Tagungsband, Nr. 3. 2. DBFZ-Jahrestagung 2016 Smart Bioenergy - Wie sieht die Zukunft der Bioenergie aus?, Leipzig: DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH. https://www.dbfz.de/fileadmin/user_upload/Referenzen/Schriftenreihen/Tagungsband/DBFZ_Jahrestagung_2016.pdf. Letzter Zugriff: 26.04.2017.
- Thrän, D. (2015): Smart Bioenergy: Technologies and concepts for a more flexible bioenergy provision in future energy systems. Springer.
- Thrän, D.; Arendt, O.; Ponitka, J.; Braun, J.; Millinger, M.; Wolf, V.; et al. (2015): Meilensteine 2030. Elemente und Meilensteine für die Entwicklung einer tragfähigen und nachhaltigen Bioenergiestrategie. Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH. <https://www.energetische-biomassenutzung.de/de/meilensteine-2030/ergebnisse.html>.
- Thrän, D.; Buchhorn, M.; Bunzel, K.; Seyfert, U.; Zeller, V. (2010): Globale und regionale Verteilung von Biomassepotentialen: Status-quo und Möglichkeiten der Präzisierung. BMVBS-Online-Publikation, Nr. 27/2010. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS).
- Thrän, D.; Pfeiffer, D. (2013): Methodenhandbuch - Stoffstromorientierte Bilanzierung der Klimagaseffekte (Bd. 4). Leipzig: DBFZ.
- Thrän, D.; Seitz, S.; Wirkner, R.; Nelles, M. (2016a): Smart Bioenergy – Innovative Konzepte für eine nachhaltige Energiewende. DBFZ-Tagungsband, Nr. 3. 2. DBFZ-Jahrestagung 2016 Smart Bioenergy - Wie sieht die Zukunft der Bioenergie aus?, Leipzig: DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH. https://www.dbfz.de/fileadmin/user_upload/Referenzen/Schriftenreihen/Tagungsband/DBFZ_Jahrestagung_2016.pdf. Letzter Zugriff: 26.04.2017.
- Thrän, D.; Witt, J.; Schaubach, K.; Kiel, J.; Carbo, M.; Maier, J.; et al. (2016b): Moving torrefaction towards market introduction – Technical improvements and economic-environmental assessment along the overall torrefaction supply chain through the SECTOR project. Biomass and Bioenergy 89 (2016) 184–200.
- Trommler, M.; Dotzauer, M.; Barchmann, T.; Matthischke, S.; Brosowski, A.; Keil, A. (2016): RegioBalance - Bioenergie-Flexibilisierung als regionale Ausgleichsop-

- tion in deutschen Stromverteilernetzen : Kurzfassung. Leipzig: DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH.
- Vogel, P. D. F. (2016): Hydrothermale Verfahren. In: M. Kaltschmitt, H. Hartmann, und H. Hofbauer (Hrsg.), Energie aus Biomasse. Springer Berlin Heidelberg.
- Wang, W.-C.; Tao, L. (2016): Bio-jet fuel conversion technologies. Renewable and Sustainable Energy Reviews 53 (2016) 801–822.
- Welteke-Fabricius, U. (2016): EEG 2017: Ein Weckruf für Biogas. Über Irrtümer und neue Wege. DBFZ-Tagungsband, Nr. 3. 2. DBFZ-Jahrestagung 2016 Smart Bioenergy - Wie sieht die Zukunft der Bioenergie aus?, Leipzig: DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH.
https://www.dbfz.de/fileadmin/user_upload/Referenzen/Schriftenreihen/Tagungsband/DBFZ_Jahrestagung_2016.pdf. Letzter Zugriff: 26.04.2017.
- Wietschel, M.; Arens, M.; Dötsch, C.; Herkel, S.; Krewitt, W.; Markewitz, P.; Möst, D.; Scheufen, M. (2010): Energietechnologien 2050 - Schwerpunkte für Forschung und Entwicklung. ISI-Schriftenreihe Innovationspotentiale. Stuttgart: Fraunhofer Verlag. <https://www.energietechnologien2050.de>
- Wüstemann, H.; Bonn, A.; Albert, C.; Bertram, C.; Biber-Freudenberger, L.; Dehnhardt, A.; et al. (2017): Synergies and trade-offs between nature conservation and climate policy: Insights from the “Natural Capital Germany – TEEB DE” study. Ecosystem Services 24 (2017) 187–199.
- Zech, K.; Grasemann, E.; Oehmichen, K.; Kiendl, I.; Schmiersahl, R.; Rönsch, S.; et al. (2013): Hy-NOW Evaluierung der Verfahren und Technologien für die Bereitstellung von Wasserstoff auf Basis von Biomasse. No. 3410010. Leipzig: DBFZ im Auftrag Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung.
- Zeymer, M.; Herrmann, A.; Oehmichen, K.; Schmiersahl, R.; Schneider, R.; Heidecke, P.; He, L.; Volz, F. (2013): Kleintechnische Biomassevergasung - Option für eine nachhaltige und dezentrale Energieversorgung. DBFZ Report No. 18. Leipzig: Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH.